



TUGAS AKHIR - TF 141581

**RETROFIT HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN)
MELALUI OVERALL HEAT TRANSFER
COEFFICIENT DENGAN MENGGUNAKAN
METODE GENETIC ALGORITHM**

ENRICO KEVIN GONAWAN
NRP 2411 100 079

Dosen Pembimbing
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



Final Project - TF 141581

HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN) RETROFIT THROUGHOUT OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT BY USING GENETIC ALGORITHM

ENRICO KEVIN GONAWAN
NRP 2411 100 079

Supervisor
Totok Ruki Biyanto, Ph.D

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN
RETROFIT HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN)
MELALUI OVERALL HEAT TRANSFER
COEFFICIENT DENGAN MENGGUNAKAN
METODE GENETIC ALGORITHM

TUGAS AKHIR

Oleh:

ENRICO KEVIN GONAWAN

Nrp. 2411 100 079

Surabaya, 14 Januari 2014
Mengetahui / Menyetujui

Pembimbing

Totok Ruki Biyanto, Ph.D
NIPN. 19710702 199802 1 001

Ketua Jurusan
Teknik Fisika ITS

Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIPN. 19650309 199002 1 001

LEMBAR PERSETUJUAN

RETROFIT HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN) MELALUI OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT DENGAN MENGGUNAKAN METODE GENETIC ALGORITHM

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Instrumentasi
Program Studi S-1 Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:

ENRICO KEVIN GONAWAN

Nrp. 2411 100 079

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D

 (Pembimbing)

2. Ir. Ya'umar, MT

 (Ketua Penguji)


3. Ir. Tutug Dhanardono, MT

 (Penguji I)

4. Dr. Gunawan Nugroho, ST, MT

 (Penguji II)

5. Arief Abdurrahman, ST, MT

 (Penguji III)

**SURABAYA
JANUARI, 2015**

RETROFIT HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN) MELALUI OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT DENGAN MENGGUNAKAN METODE GENETIC ALGORITHM

Nama Mahasiswa : ENRICO KEVIN GONAWAN
NRP : 2411 100 079
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : TOTOK RUKI BIYANTO, Ph.D

Abstrak

Heat recovery dilakukan untuk membantu mengurangi penggunaan energi dan menyediakan panas untuk digunakan pada proses lainnya. *Heat recovery* dapat dilakukan pada berbagai macam alat kerja yang membutuhkan panas, salah satunya adalah *heat exchanger* (HE). *Heat exchanger network* (HEN) merupakan susunan beberapa HE yang saling berhubungan, yang digunakan untuk melakukan *heat recovery*. Retrofit HEN dapat meningkatkan *heat recovery* pada proses yang ada. Pada penelitian ini, retrofit HEN dilakukan dengan mencari besar panas (Q) yang maksimal tanpa mengubah luas *heat transfer* atau menambah HE baru dan mengubah susunan HE pada HEN, sehingga didapatkan besar *heat recovery* yang maksimum. Metode *genetic algorithm* (GA) digunakan untuk mencari nilai U yang optimal. Pada penelitian ini sebanyak tiga skenario optimasi dilakukan dengan memberikan beberapa batasan-batasan pada model HEN yang digunakan. Pada optimasi skenario pertama, besar peningkatan U tidak diberikan batasan maximum dan minimum. Sedangkan pada optimasi skenario kedua, peningkatan U tidak diberikan batasan maximum, tetapi diberikan batasan nilai minimum yaitu nilai U pada data desain. Dan pada optimasi skenario ketiga, besar peningkatan U diberikan batasan teknologi, yaitu teknologi *internal fins*, *twisted tape insert*, *coiled wire insert*, dan *helical baffle*. Besar *heat recovery* pada optimasi skenario pertama sebesar 13.21%, pada optimasi skenario kedua sebesar 9.14%, dan pada optimasi skenario ketiga sebesar 3.60% dengan batasan teknologi *internal fin*, 2.77% dengan batasan teknologi *twisted tape inserts*, 7.69% dengan teknologi *coiled wire insert*, dan 4.61% dengan teknologi *helical baffle*.

Kata kunci : HEN, optimasi *overall heat transfer coefficient*, *heat recovery*

HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN) RETROFIT THROUGHOUT OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT BY USING GENETIC ALGORITHM

Name : ENRICO KEVIN GONAWAN
NRP : 2411 100 079
Department : Engineering Physic FTI-ITS
Supervisor : TOTOK RUKI BIYANTO, Ph.D

Abstract

Heat recovery is done to help reduce energy use and provide heat for use in other processes. Heat recovery can be performed on a wide variety of work tools that require heat, one of which is a heat exchanger (HE). Heat exchanger network (HEN) is an arrangement of several interconnected HE, which is used to conduct heat recovery. HEN retrofit can increase the heat recovery in existing processes. In this study, HEN retrofit is done by finding the maximum heat (Q) without changing the area of heat transfer or adding new HE and the arrangement of HE in HEN to obtain maximum heat recovery. Genetic algorithm (GA) is used to find the optimal U value. In this study, three case of scenarios optimization is done by giving some constraints on the HEN model. In the first case scenario optimization, the improvement of U is not given the maximum and minimum limits. While in the second case scenario optimization, the maximum improvement limit of U is not given, but has the minimum value, that is the value of U on the design data. And on the third case scenario optimization, U has limits of technology, which is the increase in the maximum of U using internal fins, twisted tape insert, coiled wire insert, and helical baffle. Heat recovery obtained in the first case scenario optimization results at 13.21%, whereas the second case scenario optimization at 9.14%, and the third case scenario optimization are 3.60% with an internal fin technology limitations, 2.77% by limitations of twisted tape inserts technology, 7.69% with coiled wire insert technology, and 4.61% with helical baffles technology.

Keywords : HEN, overall heat transfer coefficient optimization, heat recovery

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “HEAT EXCHANGER NETWORK (HEN) RETROFIT THROUGHOUT OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT BY USING GENETIC ALGORITHM”.

Adapun maksud dan tujuan dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk memenuhi persyaratan kelulusan program Studi Strata I pada jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis merasa bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna dan terdapat banyak kekurangan lainnya. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak.

Penulis mendapatkan banyak sekali bantuan, doa, dan dukungan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan YME, Tuhan yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini hingga selesai.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan kasih sayang, semangat, dan doa yang luar biasa kepada penulis sehingga laporan Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto, Ph.D sebagai dosen pembimbing pertama yang telah bersedia dalam meluangkan waktunya untuk membimbing, memeriksa, dan memberikan petunjuk serta saran yang sangat membantu dalam penyusunan laporan ini.
4. Bapak Ir. Ya'umar, MT, Ir. Tutug Dhanardono, MT, Dr. Gunawan Nugroho, ST, MT, dan Arief Abdurrahman, ST, MT sebagai dosen penguji yang telah memberikan

- saran dan masukan yang begitu berarti dalam memperbaiki laporan ini.
5. Bapak Dhany Arifianto, ST, M.Eng sebagai dosen wali yang telah membimbing dan membantu penulis dalam merencanakan studi penulis.
 6. Semua sahabat dan teman-teman yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah membantu, menemani, dan memberikan saran kepada penulis.
 7. Rekan-rekan Jurusan Teknik Fisika, khususnya angkatan 2011 yang telah memberikan masukan dan saran kepada penulis.

Akhir kata, semoga Tuhan YME memberikan berkat dan karunianya kepada mereka yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dan semoga hasil dari laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pihak yang membutuhkan.

Surabaya, 30 Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN.....	vii
Abstrak.....	ix
Abstract.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR ISTILAH.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Permasalahan.....	2
1.3. Lingkup Kerja.....	3
1.4. Tujuan.....	3
1.5. Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Heat Exchanger.....	5
2.1.1. Shell and Tube Heat Exchanger.....	5
2.1.2. Teknologi Peningkatan Overall Heat Transfer Coefficient.....	6
2.2. Persamaan Steady State Heat Exchanger.....	8
2.2.1. Log Mean Temperature Difference (LMTD).....	10
2.2.2. Overall Heat Transfer Coefficient.....	10
2.2.3. Persamaan Temperatur Output pada Heat Exchanger.....	12
2.3. Pemodelan Heat Exchanger Network.....	12
2.4. Optimasi.....	13
2.4.1. Genetic Algorithm.....	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1. Sistem yang Dikaji.....	19
3.2. Tahapan Penelitian.....	19
3.2.1. Pengumpulan Data.....	20
3.2.2. Pemodelan HEN.....	23

3.2.3. Perancangan Genetic Algorithm.....	25
3.2.4. Optimasi HEN.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1. Pemodelan HEN dan Validasi HE.....	29
4.2. Optimasi HEN.....	31
4.3. Hasil Optimasi Skenario Pertama.....	32
4.4. Hasil Optimasi Skenario Kedua.....	37
4.5. Hasil Optimasi Skenario Ketiga.....	42
4.6. Retrofit HEN.....	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
5.1. Kesimpulan.....	63
5.2. Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Urutan dan <i>Tag Number Heat Exchanger</i>	19
Tabel 3.2.	Data desain <i>heat exchanger</i> E-101B.....	24
Tabel 4.1.	Perbandingan nilai temperatur outlet dari pemodelan HE dan data desain HE	29
Tabel 4.1.	Perbandingan nilai temperatur outlet dari pemodelan HE dan data desain HE (lanjutan).....	30
Tabel 4.2.	Hasil simulasi model HEN dengan batasan	30
Tabel 4.3.	Hasil optimasi pertama	32
Tabel 4.4.	Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal.....	33
Tabel 4.5.	Perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal.....	34
Tabel 4.6.	Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal.....	35
Tabel 4.7.	Hasil optimasi kedua.....	37
Tabel 4.8.	Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal	38
Tabel 4.9.	Perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal.....	39
Tabel 4.10.	Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi kedua dengan simulasi model awal.....	40
Tabel 4.11.	Hasil optimasi dengan <i>internal fin</i>	42
Tabel 4.12.	Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi <i>internal fin</i> dengan simulasi model awal	43
Tabel 4.13.	Perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi <i>internal fin</i> dengan simulasi model awal..	44
Tabel 4.14.	Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>internal fin</i> dengan simulasi model awal	45
Tabel 4.15.	Hasil optimasi dengan <i>twisted tape insert</i>	47
Tabel 4.16.	Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi <i>twisted tape insert</i> dengan simulasi model awal.....	48

Tabel 4.17. Perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi <i>twisted tape insert</i> dengan simulasi model awal.....	49
Tabel 4.18. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>twisted tape insert</i> dengan simulasi model awal.....	50
Tabel 4.19. Hasil optimasi dengan <i>coiled wire insert</i>	51
Tabel 4.20. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi <i>coiled wire insert</i> dengan simulasi model awal.....	52
Tabel 4.21. Perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi <i>coiled wire insert</i> dengan simulasi model awal.....	53
Tabel 4.22. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>coiled wire insert</i> dengan simulasi model awal.....	54
Tabel 4.24. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi <i>helical baffle</i> dengan simulasi model awal.....	57
Tabel 4.25. Perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi <i>helical baffle</i> dengan simulasi model awal.....	58
Tabel 4.26. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>helical baffle</i> dengan simulasi model awal.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Shell and Tube Heat Exchanger.....	6
Gambar 2.2. Teknologi twisted tape di dalam heat exchanger	7
Gambar 2.3. Coiled Wire.....	8
Gambar 2.4. <i>Roulette Wheel</i>	15
Gambar 2.5. Metode <i>Crossover</i>	16
Gambar 2.6. Proses <i>Mutation</i>	16
Gambar 3.2. PFD HEN yang dikaji	22
Gambar 3.3. Kromosom GA.....	25
Gambar 3.4. Perancangan Genetic Algorithm	26
Gambar 4.1. Hasil perhitungan <i>fitness</i> optimasi skenario pertama.....	32
Gambar 4.2. Grafik perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal	34
Gambar 4.3. Grafik perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal	35
Gambar 4.4. Grafik perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal	36
Gambar 4.5. Perhitungan <i>fitness</i> pada optimasi skenario kedua	38
Gambar 4.6. Grafik perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal	39
Gambar 4.7. Grafik perbandingan nilai U (Watt/ M ² .Hr.°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal.....	40
Gambar 4.8. Grafik perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal	41
Gambar 4.9. Hasil perhitungan <i>fitness</i> pada optimasi dengan <i>internal fin</i>	43

Gambar 4.10. Grafik perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi <i>internal fin</i> dengan simulasi model awal.....	44
Gambar 4.11. Grafik perbandingan nilai U (Watt/ $\text{M}^2\cdot\text{Hr}.\text{^{\circ}C}$) antara hasil optimasi <i>internal fin</i> dengan simulasi model awal.....	45
Gambar 4.12. Grafik perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>internal fin</i> dengan simulasi model awal.....	46
Gambar 4.13. Hasil perhitungan <i>fitness</i> pada optimasi dengan <i>twisted tape insert</i>	47
Gambar 4.14. Perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi <i>twisted tape insert</i> dengan simulasi model awal.....	48
Gambar 4.15. Perbandingan nilai U (Watt/ $\text{M}^2\cdot\text{Hr}.\text{^{\circ}C}$) antara hasil optimasi <i>twisted tape insert</i> dengan simulasi model awal.....	49
Gambar 4.16. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>twisted tape insert</i> dengan simulasi model awal.....	50
Gambar 4.17. Hasil perhitungan <i>fitness</i> pada optimasi dengan <i>coiled wire insert</i>	52
Gambar 4.18. Perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi <i>coiled wire insert</i> dengan simulasi model awal.....	53
Gambar 4.19. Perbandingan nilai U (Watt/ $\text{M}^2\cdot\text{Hr}.\text{^{\circ}C}$) antara hasil optimasi <i>coiled wire insert</i> dengan simulasi model awal.....	54
Gambar 4.20. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi <i>coiled wire insert</i> dengan simulasi model awal.....	55
Gambar 4.21. Hasil perhitungan <i>fitness</i> pada optimasi dengan <i>helical baffle</i>	56
Gambar 4.22. Perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi <i>helical baffle</i> dengan simulasi model awal.....	57

Gambar 4.23. Perbandingan nilai U (Watt/ M^2 .Hr. $^{\circ}C$) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal..... 58

Gambar 4.24. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal. 59

DAFTAR ISTILAH

A	luas permukaan, m^2
Nu	Nusselt number
Pr	Prandtl number
Q	panas yang dihasilkan, J
Re	Reynold number
R_f	<i>fouling resistance</i>
T	temperatur, K
T_m	<i>log mean temperature difference, K</i>
U	<i>overall heat transfer coefficient, $J/s.m^2.K$</i>
Uc	<i>actual overall heat transfer coefficient, $J/s.m^2.K$</i>
c_p	kalor jenis, $J/Kg.K$
d	diameter pipa, m
h	<i>heat transfer coefficient, $J/s.m^2.K$</i>
k	<i>thermal conductivity, $kW/m.K$</i>
k1	konstanta 1
k2	konstanta 2
m	massa, Kg
v	laju aliran, m/s

Simbol Yunani

Δ	delta
μ	viskositas, $Kg/m.s$

Subskrip

c	fluida dingin
h	fluida panas
i	inlet
o	outlet
w	wall

Singkatan

GA	<i>genetic algorithm</i>
HEN	<i>heat exchanger network</i>



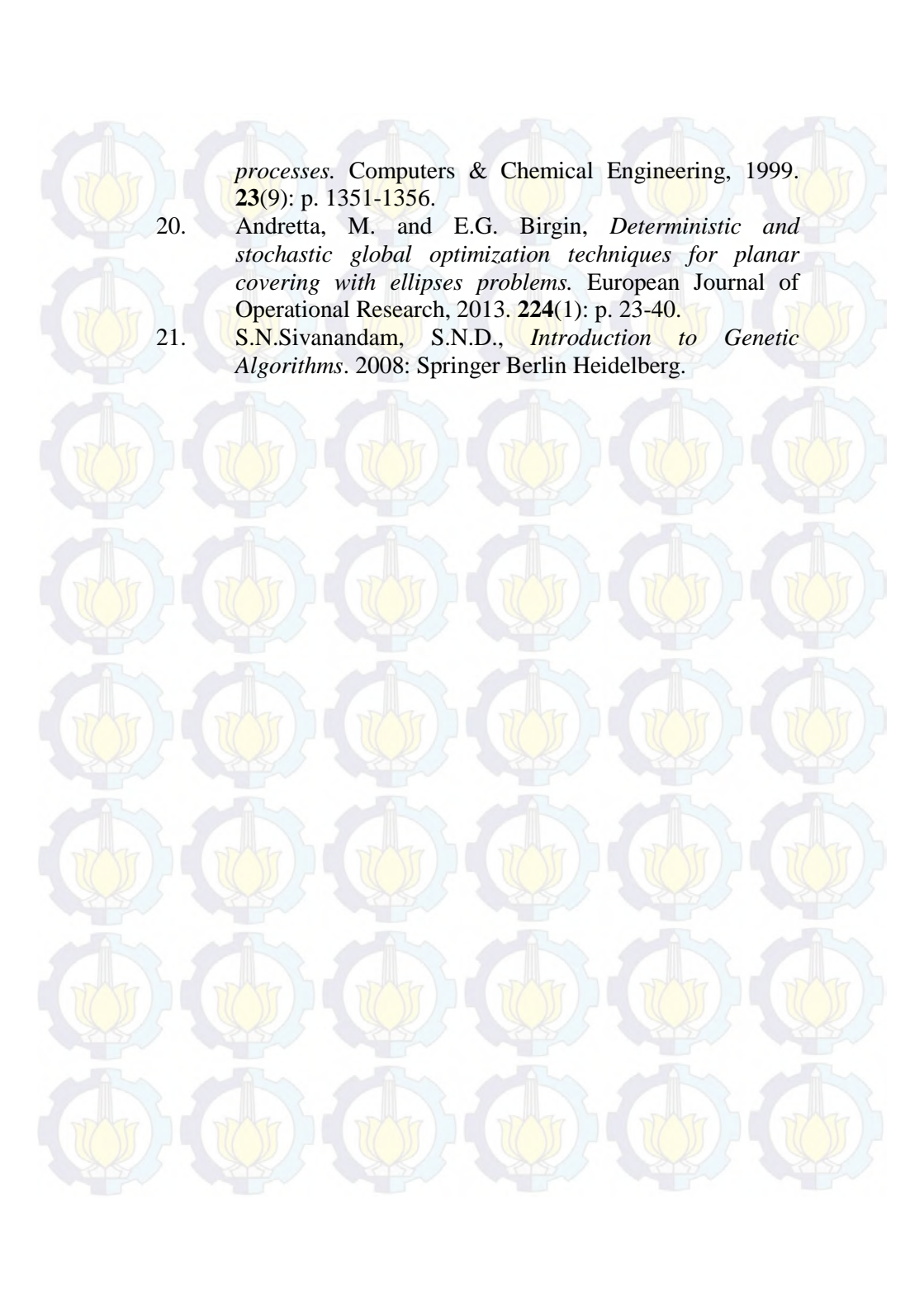
HE
LMTD

*heat exchanger
log mean temperature difference*

DAFTAR PUSTAKA

1. Smith, R.M., *Chemical process: design and integration*. 2005: John Wiley & Sons.
2. Parsons, D.J., et al., *Carbon Brainprint Case Study: optimising defouling schedules for oil-refinery preheat trains*. 2011.
3. Liu, X.-W., X. Luo, and H.-G. Ma, *Retrofit of Heat Exchanger Networks by a Hybrid Genetic Algorithm with the Full Application of Existing Heat Exchangers and Structures*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014. **53**(38): p. 14712-14720.
4. Pan, M., I. Bulatov, and R. Smith, *Novel MILP-based optimization method for retrofitting heat exchanger networks*. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2012. **30**: p. 567-571.
5. Wang, Y., R. Smith, and J.-K. Kim, *Heat exchanger network retrofit optimization involving heat transfer enhancement*. *Applied Thermal Engineering*, 2012. **43**: p. 7-13.
6. Ijaz, H., U.M.K. Ati, and V. Mahalec, *Heat exchanger network simulation, data reconciliation & optimization*. *Applied Thermal Engineering*, 2013. **52**(2): p. 328-335.
7. Kuppan, T., *Heat exchanger design handbook*. 2000, New York: Marcel Dekker.
8. Biyanto, T.R., et al., *Cleaning Schedule Optimization of Heat Exchanger Networks Using Particle Swarm Optimization*, in *Proceedings of the 3rd Applied Science for Technology Innovation, ASTECHNOVA 2014, International Energy Conference*. 2014: Yogyakarta, Indonesia. p. 196-203.
9. Najafi, H., B. Najafi, and P. Hoseinpoori, *Energy and cost optimization of a plate and fin heat exchanger using genetic algorithm*. *Applied Thermal Engineering*, 2011. **31**(10): p. 1839-1847.

10. Ravagnani, M.A.S.S., et al., *Heat exchanger network synthesis and optimisation using genetic algorithm*. Applied Thermal Engineering, 2005. **25**(7): p. 1003-1017.
11. Huq, M., A.M. Aziz-ul Huq, and M.M. Rahman, *Experimental measurements of heat transfer in an internally finned tube*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1998. **25**(5): p. 619-630.
12. Mokkaapati, V. and C.-S. Lin, *Numerical study of an exhaust heat recovery system using corrugated tube heat exchanger with twisted tape inserts*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. **57**(0): p. 53-64.
13. García, A., et al., *Enhancement of laminar and transitional flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. **50**(15–16): p. 3176-3189.
14. Lei, Y.-G., et al., *Design and optimization of heat exchangers with helical baffles*. Chemical Engineering Science, 2008. **63**(17): p. 4386-4395.
15. Martínez, D.S., et al., *Heat transfer enhancement of laminar and transitional Newtonian and non-Newtonian flows in tubes with wire coil inserts*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. **76**(0): p. 540-548.
16. Schmitt, M. and R. Wanka, *Particle swarm optimization almost surely finds local optima*. Theoretical Computer Science, 2015. **561**, Part A(0): p. 57-72.
17. Bagajewicz, M.J. and V. Manousiouthakis, *On the Generalized Benders Decomposition*. Computers & Chemical Engineering, 1991. **15**(10): p. 691-700.
18. Adjiman, C.S., et al., *A global optimization method, BB, for process design*. Computers & Chemical Engineering, 1996. **20**, Supplement 1(0): p. S419-S424.
19. Choi, S.H., J.W. Ko, and V. Manousiouthakis, *A stochastic approach to global optimization of chemical*

- 
- processes. Computers & Chemical Engineering, 1999. **23**(9): p. 1351-1356.
20. Andretta, M. and E.G. Birgin, *Deterministic and stochastic global optimization techniques for planar covering with ellipses problems*. European Journal of Operational Research, 2013. **224**(1): p. 23-40.
21. S.N.Sivanandam, S.N.D., *Introduction to Genetic Algorithms*. 2008: Springer Berlin Heidelberg.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Enrico Kevin Gonawan, dengan nama panggilan Enrico dilahirkan di Surabaya pada tanggal 18 Desember 1993. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Santo Joseph I, Denpasar tahun 1999-2005, SMPN I, Denpasar tahun 2005-2006 kemudian pindah sekolah ke SMP MARGIE, Surabaya tahun 2006-2008, SMAK St.Louis I, Surabaya tahun 2008-2011. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2011. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam mengikuti materi kuliah dengan baik. Penulis juga mengikuti lomba “Petrobrain Competition” yang diselenggarakan oleh Universiti Teknologi Malaysia dan juga “Oil Rig Competition” yang diselenggarakan oleh Universitas Trisakti. Apabila terdapat kritik dan saran, dapat menghubungi penulis melalui email : **enrico.kevin.g@gmail.com**.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Heat recovery adalah pengambilan atau penggunaan kembali panas dari produk dan atau material yang akan dibuang untuk memanaskan bahan baku. Proses ini bisa saja terdapat pada bangunan, seperti ruang pemanas, ventilasi dan sebagainya, atau pada peralatan proses, seperti *oven*, *furnace*, *heat exchanger*, dan sejenisnya. *Heat recovery* akan sangat berguna bagi perusahaan yang mengkonsumsi energi yang sangat besar.

Heat recovery dapat dicapai dengan melakukan *heat integration*. *Heat integration* dapat diaplikasikan pada *heat exchanger network* (HEN), reaktor, kolom distilasi, *evaporator* dan *dryer*, dll., [1]. Dengan menggunakan *heat integration*, maka penggunaan energi secara keseluruhan pada proses itu sendiri dapat dihemat hingga mencapai 70% pada sebuah HEN [2]. Sehingga hampir semua fungsi objektif dari *heat integration* adalah memaksimalkan panas dari *heat recovery* pada grassroot maupun retrofit.

Sekarang ini retrofit *heat exchanger network* (HEN) mendapat perhatian besar baik dari kalangan masyarakat akademik maupun industri. Retrofit HEN sangat penting terutama bagi *plant* dengan pemakaian energi yang besar untuk menghemat energi, kepentingan lingkungan, dan berujung pada peningkatan daya saing pasar [3]. Retrofit HEN memungkinkan peningkatan *heat recovery* pada proses yang ada. Peningkatan tersebut dapat dicapai melalui berbagai cara, yaitu dengan menambahkan tambahan *heat transfer area* atau menginstal *heat exchanger* baru, dan merestrukturisasi susunan *heat exchanger* yang ada [4].

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan *heat recovery* pada *heat exchanger network* [5]. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan *pinch technology* (mengubah susunan *heat exchanger* pada HEN) dan berhasil menghemat energy sebesar 3,4%. Terdapat cara lain yang dapat dilakukan untuk melakukan retrofit pada *heat exchanger network*

adalah dengan mengubah *overall heat transfer coefficient* (U) sehingga didapatkan energi panas (Q) yang maksimum dengan mempertimbangkan keterbatasan kondisi operasi dan teknologi yang ada pada setiap desain *heat exchanger*. Penentuan energi panas (Q) maksimum dapat dicari melalui besar temperatur output pada setiap *heat exchanger* di dalam *heat exchanger network* (HEN). Untuk menentukan besar panas yang dihasilkan dari temperatur output, maka diperlukan pemodelan HEN yang sesuai. Hampir semua pemodelan HEN yang dilakukan menggunakan kesetimbangan massa dan energi, baik pada model *linear* dan *non-linear* maupun software komersial, seperti GAMS, dan buatan sendiri, seperti MATLAB [6-8].

Dalam mencapai U yang optimum pada setiap HE, diperlukan model HEN yang sesuai, fungsi objektif dan teknik optimasi. Untuk mensimulasikan HE di dalam HEN, digunakan persamaan linear dan *non-linear* sehingga dimasukkan ke dalam kelas permasalahan *non-linear programming*. Pemecahan permasalahan *non-linear programming* yang menghasilkan banyak local optimum, memerlukan teknik optimasi yang dapat menemukan solusi global optimum. Salah satu pemecahan global optimum adalah dengan menggunakan algoritma evolusi. Salah satu algoritma evolusi yang paling banyak digunakan adalah *genetic algorithm* (GA) [9, 10].

Penelitian ini fokus pada peningkatan *heat recovery* dengan mengoptimalkan *overall heat transfer coefficient* (U). Optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan keterbatasan operasi dan desain *heat exchanger*, serta ketersediaan teknologi yang sudah ada. Teknologi tersebut adalah *internal fins* [11], *twisted-tape inserts* [12], *coiled wire inserts* [13], dan *helical baffles* [14].

1.2. Rumusan Permasalahan

Masalah yang dibahas pada tugas akhir ini adalah bagaimana cara mengoptimasi *heat exchanger network* (HEN) dalam mengkonversi panas yang tersedia dengan mengoptimalkan besar *heat transfer coefficient* (U) dengan batasan teknologi yang sudah

tersedia dan tanpa adanya batasan operasi, desain *heat exchanger*, dan teknologi sehingga diperoleh *heat recovery* yang optimal.

1.3. Lingkup Kerja

Adapun lingkup kerja dari penelitian ini adalah pengambilan data desain pada 10 *heat exchanger* (HE) di dalam *heat exchanger network* (HEN). Kemudian membuat perancangan *genetic algorithm* yang akan digunakan sebagai *optimizer*. Setelah itu melakukan pemodelan HE pada HEN yang sudah ada (*existing*). Lalu menentukan fungsi objektif dan batasan-batasan berdasarkan persamaan dan data yang ada. Model HEN beserta fungsi objektif dan batasan-batasan yang telah diberikan dioptimasi dengan menggunakan *genetic algorithm optimizer*. Hasil dari optimasi tersebut kemudian dianalisis untuk dijadikan laporan pada tugas akhir.

1.4. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah menentukan besar *overall heat transfer coefficient* (U) dan teknologi yang sesuai dengan mempertimbangkan keterbatasan kondisi operasi dan desain seluruh *heat exchanger* pada HEN, serta adanya batasan maupun tanpa batasan teknologi yang tersedia sehingga didapatkan besar panas (Q) yang maksimal.

1.5. Manfaat

Manfaat dari dilakukannya tugas akhir ini adalah dapat meningkatkan *heat recovery* yang dihasilkan pada HEN yang akan digunakan, serta dapat digunakan sebagai referensi pada penelitian lain.



Halaman ini sengaja dikosongkan

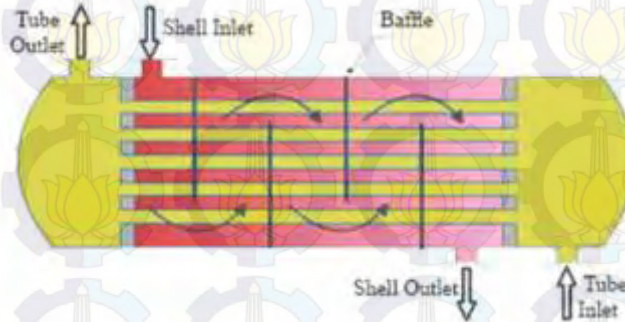
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Heat Exchanger

Heat Exchanger (HE) adalah alat penukar panas yang dapat digunakan untuk memanfaatkan atau mengambil panas dari suatu fluida untuk dipindahkan ke fluida lain. Proses perpindahan panas ini biasanya terjadi dari fase cair ke fase cair atau dari fase uap ke fase cair. Pada dasarnya, laju perpindahan energi yang terdapat pada *heat exchanger* dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut adalah kecepatan aliran fluida, konduktivitas termal, viskositas, kapasitas kalor spesifik, perbedaan temperatur pada kedua jenis fluida, dan *heat transfer area*. Terdapat beberapa jenis *heat exchanger*, yaitu *tubular heat exchanger*, *plate heat exchanger*, *shell and tube heat exchanger*, dan *jacketed vessel*.

2.1.1. Shell and Tube Heat Exchanger

Tipe *shell and tube heat exchanger* sangat sering ditemukan pada industri perminyakan, terutama pada proses yang memiliki aliran laju massa yang cukup besar. Tipe ini sering juga dijumpai pada *heat exchanger network* (HEN), dimana HEN merupakan kumpulan dari beberapa *heat exchanger* yang saling berhubungan. HEN digunakan untuk meningkatkan temperatur fluida dalam rentang yang cukup besar. Dengan adanya HEN, sebagai fungsi *pre-heating*, maka kerja *furnace* menjadi lebih ringan. Gambar skematik *heat exchanger* tipe *shell and tube heat exchanger* dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1. Shell and Tube Heat Exchanger

Pada bagian *tube* mengalir fluida dengan temperatur yang lebih rendah dari pada fluida yang mengalir di bagian *shell*. Pada bagian *shell*, terdapat *baffle* yang digunakan untuk mengarahkan aliran fluida sehingga fluida yang mengalir dari *shell inlet* tidak langsung menuju *shell outlet*. Selain itu, *baffle* juga digunakan untuk menahan pipa *tube* yang berada di dalam *shell* sehingga dapat meminimalkan getaran pada pipa.

2.1.2. Teknologi Peningkatan Overall Heat Transfer Coefficient

Peningkatan nilai *overall heat transfer coefficient*, dapat dilakukan dengan mengubah bentuk pada bagian sisi *tube* dan sisi *shell*. Terdapat tiga teknologi yang dapat dilakukan pada sisi *tube*, yaitu

1. *Internal fins*

Teknologi ini dilakukan dengan memberikan *fin* pada bagian dalam dari *tube*. Dengan ukuran *fin* yang tepat, teknologi ini dapat menaikkan besar *overall heat transfer coefficient*. Pemberian 6 buah *fin* longitudinal dengan tinggi 15 mm dan ketebalan 3 mm pada sebuah *tube* sepanjang 15,2 m dengan diameter dalam sebesar 70 mm dapat menaikkan *overall heat transfer coefficient* sebesar 52% [11].

2. *Twisted-tape inserts*

Penggunaan teknologi ini menyebabkan terjadinya aliran spiral sepanjang *tube* untuk meningkatkan turbulensi. Teknologi ini dapat meningkatkan *heat transfer* hingga mencapai 35,5% [12]. Bentuk dari teknologi ini dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. Teknologi twisted tape di dalam heat exchanger [12].

3. *Coiled wire inserts*

Teknologi ini terdiri dari pegas yang berbentuk spiral. Keuntungan utama dari teknologi *insert* terhadap teknologi lainnya adalah instalasi yang mudah dalam *exchanger* yang ada [13]. Teknologi ini biasanya digunakan pada *tube* dengan permukaan yang halus. Dikarenakan biaya yang murah, teknologi insert yang

sering digunakan adalah *twisted tape inserts* dan *coiled wire inserts*. Teknologi *coiled wire inserts* memungkinkan peningkatan heat transfer hingga mencapai 300% [15]. Bentuk dari *coiled wire* dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3. Coiled Wire [4].

Dan juga terdapat satu teknologi yang dapat dilakukan pada sisi *shell*, yaitu

1. *Helical baffles*

Teknologi ini dilakukan dengan mengubah susunan dari *baffle* yang terdapat pada *heat exchanger* dengan tujuan untuk meningkatkan besar *heat transfer coefficient*. Peningkatan besar *heat transfer coefficient* juga disertai dengan peningkatan *pressure drop* pada *heat exchanger*. Teknologi ini dapat meningkatkan besar *heat transfer capacity* hingga 75% serta *pressure drop* sebesar 50% [14].

2.2. Persamaan Steady State Heat Exchanger

Pada dasarnya, dalam menganalisis kinerja dari *heat exchanger*, dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip kesetimbangan massa dan energi. Aliran fluida panas dan dingin memiliki jumlah energi yang sama, dengan begitu maka [7]

$$Q_h = Q_c \quad (2.1)$$

dimana,

Q_h = Panas yang dihasilkan oleh fluida panas (J)

Q_c = Panas yang dihasilkan oleh fluida dingin (J)

Sedangkan persamaan dari panas yang dihasilkan adalah

$$Q = m c_p (T_i - T_o) \quad (2.2)$$

dimana,

Q = laju perpindahan panas (J)

m = massa dari fluida yang mengalir (Kg)

c_p = kalor jenis dari fluida (J/Kg.K)

T_i = temperatur fluida pada inlet *heat exchanger* (K)

T_o = temperatur fluida pada outlet *heat exchanger* (K)

Perpindahan panas yang terjadi pada *heat exchanger* adalah fluida panas akan memberikan panas dan fluida dingin akan menerima panas, sehingga didapatkan persamaan untuk kesetimbangan massa dan energi yang terdapat pada *heat exchanger* sebagai berikut [7]

$$Q = m_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) = m_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2.3)$$

dimana,

m_h = massa dari fluida panas yang mengalir (produk) (Kg)

$c_{p,h}$ = kalor jenis dari fluida panas (J/Kg.K)

$T_{h,i}$ = temperatur fluida panas pada inlet *heat exchanger* (K)

$T_{h,o}$ = temperatur fluida panas pada outlet HE (K)

m_c = massa dari fluida dingin yang mengalir (*crude*) (Kg)

$c_{p,c}$ = kalor jenis dari fluida dingin (J/Kg.K)

$T_{c,i}$ = temperatur fluida dingin pada inlet HE (K)

$T_{c,o}$ = temperatur fluida dingin pada outlet HE (K)

Persamaan laju perpindahan panas pada *heat exchanger* yang berlangsung antara sisi tube dan shell, yaitu [7]

$$Q = U A \Delta T_m \quad (2.4)$$

dimana,

$$\begin{aligned} U &= \text{mean overall heat transfer coefficient (J/s.m}^2\text{.K)} \\ A &= \text{luas permukaan terjadinya perpindahan panas (m}^2\text{)} \\ \Delta T_m &= \text{log mean temperature difference (LMTD) (K)} \end{aligned}$$

2.2.1. Log Mean Temperature Difference (LMTD)

LMTD adalah rata – rata perbedaan temperatur antara fluida panas (produk) dan dingin (*crude*). Persamaan dari LMTD adalah [7]

$$\Delta T_m = LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \quad (2.5)$$

dimana,

$$\Delta t_1 = T_{hot,in} - T_{cold,in} \quad (2.6)$$

$$\Delta t_2 = T_{hot,out} - T_{cold,out} \quad (2.7)$$

2.2.2. Overall Heat Transfer Coefficient

Overall heat transfer coefficient (U) adalah ukuran kemampuan keseluruhan dari serangkaian hambatan konduktif dan konveksi untuk mentransfer panas. *Heat transfer coefficient* diterapkan pada perhitungan perpindahan panas dalam *heat exchanger*. Pada *heat exchanger*, U dapat digunakan untuk menentukan total transfer panas antara dua aliran dalam *heat exchanger* dengan menggunakan Persamaan (2.4).

Overall heat transfer coefficient, U, menentukan efisiensi yang berubah terhadap waktu. Hal ini tergantung pada *heat transfer coefficients* inlet dan outlet, *thermal conductivity* pada dinding tube dan *fouling resistance* di kedua sisi tabung seperti yang diberikan oleh persamaan berikut, [7]

$$\frac{1}{U} = \frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o R_{f,i}}{d_i} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k_w} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o} \quad (2.8)$$

dimana,

R_f = *fouling resistance*

h = *heat transfer coefficient* (J/s·m²·K)

k_w = *thermal conductivity* pada dinding (kW/m.K)

d = *diameter pipa tube* (m)

i = inlet

o = outlet

Besar dari *heat transfer coefficient* pada inlet dan outlet dipengaruhi oleh Nusselt number. Hal tersebut dapat dilihat pada Persamaan (2.9) [12].

$$Nu = h d_h / k \quad (2.9)$$

dimana,

Nu = Nusselt number

k = *thermal conductivity* (kW/m.K)

d_h = *diameter pipa yang mengalirkan fluida panas* (m)

Nusselt number dipengaruhi oleh Reynold number dan Prandtl Number yang dapat dilihat dari persamaan korelasi Dittus-Boelter pada Persamaan (2.10) [12].

$$Nu = 0.024 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (2.10)$$

dimana,

Re = Reynold number

Pr = Prandtl number

Reynold number dan Prandtl number dipengaruhi oleh viskositas dari fluida. Hal tersebut dapat dilihat pada Persamaan (2.11) dan (2.12) [12].

$$Re = v d_h / \mu \quad (2.11)$$

$$Pr = c_p \mu / k \quad (2.12)$$

dimana,

$$\begin{aligned} &= \text{massa jenis fluida (Kg/m}^3\text{)} \\ v &= \text{laju aliran fluida (m/s)} \\ \mu &= \text{viskositas fluida (Kg/m.s)} \end{aligned}$$

2.2.3. Persamaan Temperatur Output pada Heat Exchanger

Persamaan-persamaan *steady state heat exchanger* pada Persamaan (2.1) – (2.7) digunakan untuk melakukan simulasi pada *heat exchanger*. Perubahan laju perpindahan panas dari fluida panas menuju fluida dingin, setara dengan perubahan entalphy pada fluida panas, sehingga berdasarkan Persamaan (2.1) – (2.7), maka persamaan temperatur output pada *heat exchanger* menjadi [8]

$$T_{v,e} = \left[\frac{k_1 \exp(-k_1 F(k_1 - 1)) - 1}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{h,i} + \left[\frac{(1 - k_1) \exp(-k_1 F(k_1 - 1))}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{c,i} \quad (2.13)$$

$$T_{v,e} = \left[\frac{\exp(-k_1 F(k_1 - 1)) - 1}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{c,i} + \left[\frac{(k_1 - 1)}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{h,i} \quad (2.14)$$

dimana,

$$k_1 = \frac{m_h c_{p,h}}{m_c c_{p,c}} \quad (2.15)$$

$$k_2 = \frac{UA}{m_h c_{p,h}} \quad (2.16)$$

k1 = konstanta 1

k2 = konstanta 2

2.3. Pemodelan Heat Exchanger Network

Heat exchanger network merupakan kumpulan dari beberapa *heat exchanger* yang saling berintegrasi. Keberadaan HEN dapat membantu dalam mengurangi beban boiler dalam memanaskan fluida. HEN telah menjadi sesuatu yang umum pada industri pengolahan minyak, pengolahan bahan kimia, dll. Susunan dari *heat exchanger* yang terdapat pada HEN tidak dilakukan dengan sembarangan. Pada HEN terdapat fluida dingin yang melewati setiap *heat exchanger* dan terdapat fluida panas yang mengalir melewati lebih dari satu HE.

2.4. Optimasi

Optimasi adalah cara untuk meningkatkan kinerja suatu hal hingga maksimal. Dengan adanya optimasi, sebuah proses akan menjadi lebih efisien. Proses tersebut dapat berupa proses produksi, proses pada program komputer, proses pada kehidupan sehari-hari, dan lain-lain. Dengan meningkatnya efisiensi dari sebuah proses, maka banyak hal yang dapat dihemat, seperti energi, finansial, waktu, dan lain-lain.

Optimasi pada persamaan *non-linear* akan menghasilkan banyak local optimum. Teknik optimasi yang dilakukan dalam mencari nilai local optimum masih belum dapat menemukan nilai local optimum yang benar [16]. Oleh karena itu diperlukan teknik optimasi yang dapat menyelesaikan persamaan *non-linear* dengan mencari global optimum. Optimasi yang dapat dilakukan adalah optimasi deterministik dan stokastik.

Optimasi deterministik dapat menemukan global optimum pada persamaan *non-linear* dengan menggunakan algoritma *bender decomposition* [17] dan *branch and bound* [18]. Kedua algoritma tersebut dapat memastikan *finite v-convergence* (konvergensi terhadap nilai global optimum dalam langkah-langkah perhitungan yang terbatas untuk toleransi error yang dibatasi) dan global optimum dari solusi yang didapatkan [19]. Namun optimasi deterministik tidak dapat menyelesaikan permasalahan yang besar [20].

Salah satu masalah pada permasalahan persamaan *non-linear* adalah permasalahan NP (*nondeterministic polinomial time*). Optimasi stokastik memiliki kemampuan untuk menyelesaikan persamaan *non-linear* tanpa dipengaruhi oleh NP [19]. Algoritma optimasi stokastik berdasarkan pada metode *adaptive random search*, seperti *evolutionary algorithm*, memiliki prosedur pencarian yang mirip dengan evolusi spesies dalam sistem alamiah. Salah satu jenis algoritma pada *evolutionary algorithm* adalah *genetic algorithm* (GA).

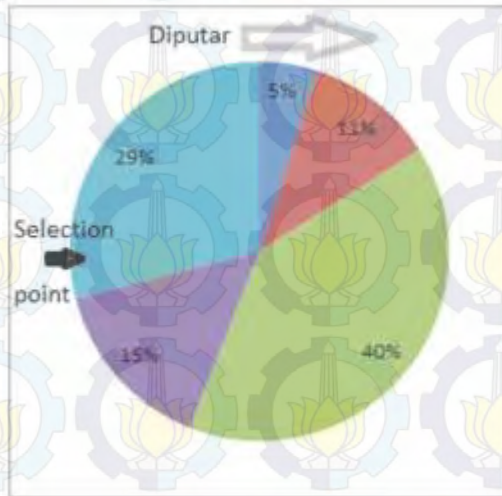
2.4.1. Genetic Algorithm

Genetic Algorithm merupakan salah satu algoritma optimasi stokastik. *Genetic Algorithm* (GA) adalah algoritma pencarian heuristik adaptif berdasarkan ide-ide evolusi seleksi alam dan genetika. GA menggunakan pencarian secara acak untuk menyelesaikan masalah pada optimasi. Pencarian secara acak oleh GA dilakukan dengan mengeksplorasi informasi yang sudah ada untuk meningkatkan performansi yang lebih baik. Prinsip dasar dari GA adalah teori dari Charles Darwin, “Survival of The Fittest”.

GA mensimulasikan teori dari Charles Darwin tersebut dengan menggunakan individu-individu yang telah ada pada beberapa generasi. Setiap generasi terdapat karakter dari individu yang dapat disamakan dengan DNA. GA terdiri dari beberapa tahap, yaitu tahap seleksi individu, *crossover*, dan *mutation*.

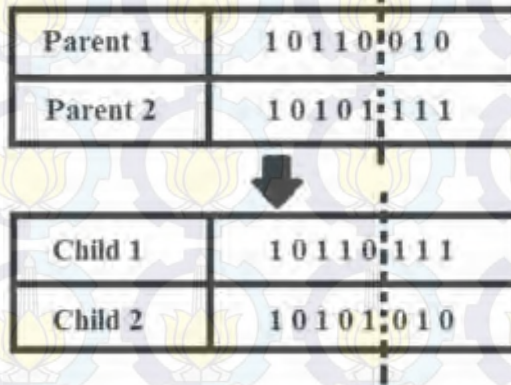
Seleksi individu merupakan tahap dimana gen setiap individu dipilih dan diambil yang terbaik untuk digunakan pada tahap *crossover*. Metode *crossover* yang digunakan adalah metode *roulette wheel*. Proses pemilihan pada metode tersebut didasarkan pada evaluasi fungsi *fitness* dari setiap individu. Fungsi *fitness* tersebut adalah fungsi objektif yang digunakan untuk menentukan apakah individu tersebut sudah memiliki nilai yang mendekati nilai tujuan. Individu yang memiliki nilai *fitness* yang besar memiliki kemungkinan yang lebih tinggi untuk terpilih, tetapi tidak menutup kemungkinan pada individu dengan

nilai *fitness* yang rendah untuk terpilih [21]. Contoh metode *roulette wheel* dapat dilihat pada **Gambar 2.4. Roulette Wheel**



Gambar 2.4. Roulette Wheel

Crossover merupakan tahap untuk menghasilkan individu baru. *Crossover* dapat dianalogikan sebagai proses reproduksi. Dua individu yang telah diseleksi akan menjadi orang tua dari generasi individu selanjutnya. Individu baru akan memiliki gen yang bagus pada kedua orang tua. Sehingga proses ini dilakukan untuk mendapatkan individu yang lebih baik daripada orang tua individu. Semakin baik *fitness* yang dimiliki oleh orang tua, maka individu yang dihasilkan akan semakin baik [21]. Contoh proses *crossover* dapat dilihat pada **Gambar 2.5.**



Gambar 2.5. Metode *Crossover*

Mutation merupakan proses untuk menghindari terperangkapnya algoritma pada local optimum. *Mutation* memiliki peran untuk mengembalikan material genetik yang hilang dan juga sebagai pengganggu informasi genetik secara acak. Hasil dari mutasi bisa saja menghasilkan fitness yang lebih baik maupun tidak. Proses ini terjadi dengan mengubah salah satu bit pada kromosom GA, seperti pada **Gambar 2.6**. Terjadinya mutasi pada kromosom memiliki kemungkinan yang sangat kecil pada GA.



Gambar 2.6. Proses *Mutation*

Pada proses GA, terdapat *elitism*. *Elitism* dapat dianalogikan sebagai pelindung dari kromosom pada individu yang memiliki *fitness* yang paling baik pada generasinya. Fungsi utama dari *elitism* adalah untuk memastikan kromosom yang terbaik tidak akan hilang pada optimasi dikarenakan peristiwa mutasi. Dengan adanya *elitism*, hasil dari GA akan meningkat secara signifikan [21].

GA didasarkan pada analogi dengan struktur genetik dan perilaku kromosom dalam populasi individu menggunakan dasar sebagai berikut:

- a. Individu dalam populasi bersaing untuk sumber daya dan pasangan.
- b. Individu yang paling sukses di setiap 'kompetisi' akan menghasilkan lebih banyak keturunan (hasil dari *crossover*) dari individu yang berkinerja buruk.
- c. Gen dari individu yang baik akan menyebarkan ke seluruh populasi (*mutation*) sehingga dua gen orang tua yang baik kadang-kadang akan menghasilkan keturunan yang lebih baik daripada mereka.
- d. Dengan demikian setiap generasi berturut-turut akan menjadi lebih cocok untuk lingkungan mereka.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Sistem yang Dikaji

Sistem yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem *heat exchanger network* (HEN) yang memiliki 10 *heat exchanger* (HE) tipe *shell and tube heat exchanger*. Setiap HE memiliki nilai properties yang berbeda. Input fluida dingin dari HEN adalah minyak mentah yang akan ditingkatkan temperaturnya sehingga hasil outputnya akan menghasilkan temperatur yang diinginkan. Sedangkan input dari fluida panas pada HEN adalah hasil dari produk minyak, yaitu naphta, kerosine, HDO, dan LDO, yang akan melepaskan panas untuk diterima oleh fluida dingin, sehingga hasil output dari fluida panas akan memiliki temperatur yang lebih rendah dari inputnya. Urutan serta *tag number* dari HE yang terdapat pada HEN dapat dilihat pada **Tabel 3.1**. Urutan dan *Tag Number Heat Exchanger*

Tabel 3.1. Urutan dan *Tag Number Heat Exchanger*

Urutan ke -	Tag Number
1	E-101
2	E-102
3	E-103
4	E-131
5	E-104
6	E-105
7	E-106
8	E-107
9	E-108
10	E-109

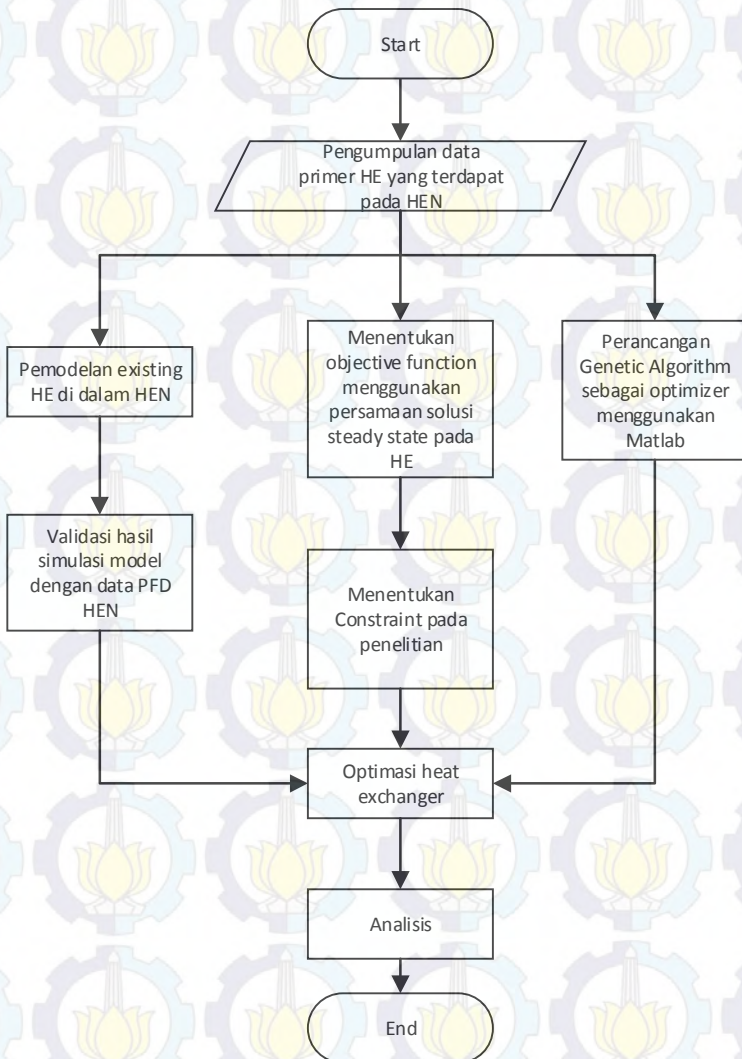
3.2. Tahapan Penelitian

Secara garis besar, penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah, yaitu (i) pengumpulan data, (ii) pemodelan HEN, (iii)

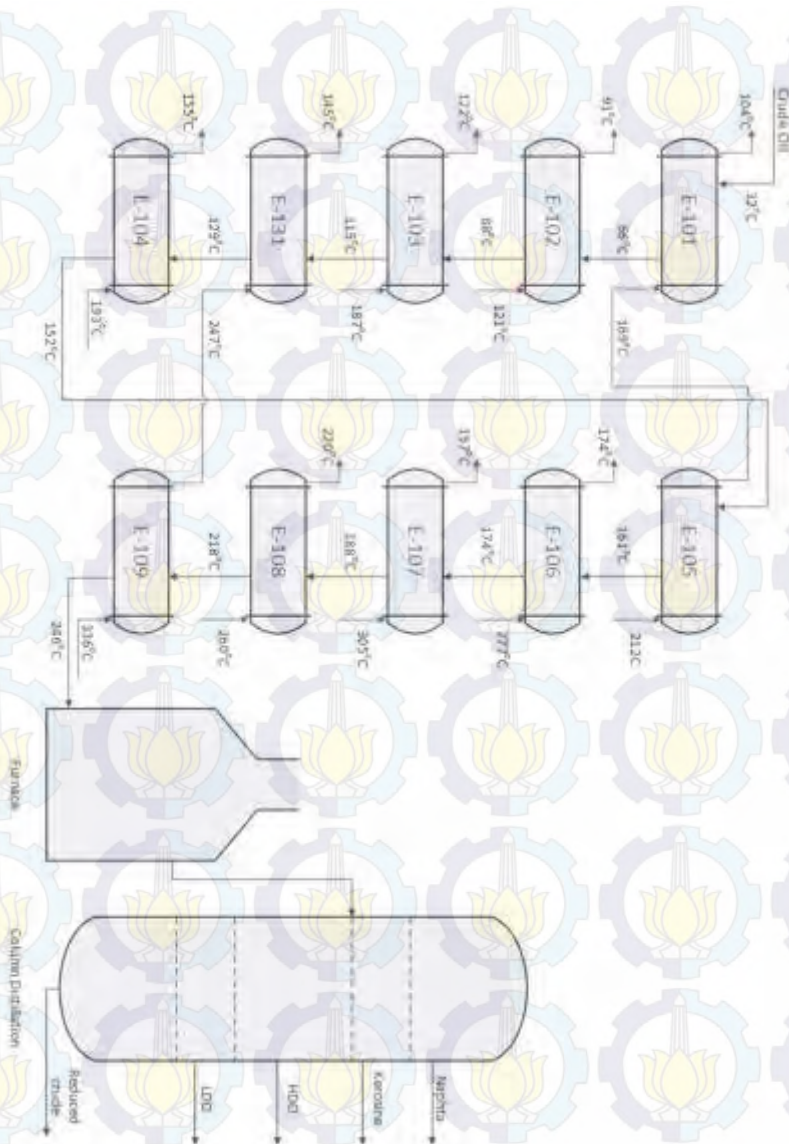
perancangan *genetic algorithm*, (iv) optimasi HEN. Flow chart dari penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.1.**

3.2.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan data pada *heat exchanger* (HE) yang terdapat di dalam *heat exchanger network* (HEN). Data didapatkan dari sebuah industri pengolahan minyak mentah. Data yang dikumpulkan adalah data desain dari *heat exchanger* dan PFD proses HEN. Data yang terdapat pada data desain berisikan data *heat exchanger* mengenai kondisi teperatur inlet dan outlet, besar flow yang mengalir pada masing-masing *shell* dan *tube*, jenis fluida yang dialirkan, dan lain-lain. PFD digunakan untuk melihat arah aliran dari fluida yang mengalir pada HEN. PFD dari HEN yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 3.2.**



Gambar 3.1. Flowchart Penelitian



Gambar 3.2. PFD HEN yang dikaji

3.2.2. Pemodelan HEN

HEN yang digunakan, dimodelkan pada software MATLAB. Pemodelan pada HEN dilakukan dengan menggunakan persamaan *steady state* pada HE. Persamaan yang digunakan dapat dilihat pada persamaan berikut ini,

$$T_{c,i} = \frac{k_1 \{ \exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - 1 \}}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} T_{c,i} + \frac{(1 - k_1) \exp(-k_2 F(k_1 - 1))}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} T_{h,i}$$

$$T_{h,i} = \left[\frac{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - 1}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{c,i} + \left[\frac{(k_1 - 1)}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{h,i}$$

$$k_1 = \frac{m_h C_{p,h}}{m_c C_{p,c}}$$

$$k_2 = \frac{UA}{m_h C_{p,h}}$$

Kemudian, hasil dari pemodelan HEN divalidasi dengan cara membandingkan hasil temperatur output pada setiap HE dengan temperatur output yang terdapat pada data desain setiap HE. Apabila hasil temperatur output model sama dengan data desain, maka dilakukan penentuan batasan-batasan yang akan digunakan pada model tersebut. Data yang digunakan pada model HEN dapat dilihat pada **Tabel 3.2** dan Lampiran A.

Tabel 3.2. Data desain *heat exchanger* E-101B

E-101B	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Kerosene		Crude	
Fluid Quantity (kg/hr)	233388		555795	
(kg/s)	64.83		154.39	
Temperature in/out °C	169	104	32	66
Average Temperature	136.5		49	
dT	65		34	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.0003	0.0005	0.0020	0.0011
average	0.0004		0.0016	
Density (kg/m ³)	702	756	804	776
average	729		790	
Specific heat / Cp (J/Kg.K)	2553.95	2252.5	1842.19	2009.66
Average	2403.22		1925.93	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0004		0.0007	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	372.2			
U (Watt/m ² .Hr.°C)	432.87			
A (m ²)	289			

Batasan yang diberikan pada model HEN yang akan digunakan untuk melakukan optimasi adalah

1. Besar laju aliran massa pada setiap *heat exchanger* sama dengan laju aliran massa pada *heat exchanger* E-101B.

2. Besar temperatur outlet fluida dingin pada *heat exchanger* akan menjadi besar temperatur inlet fluida dingin pada *heat exchanger* selanjutnya.
3. Besar nilai temperatur dari outlet fluida panas pada *heat exchanger* E-105 akan menjadi besar temperatur inlet dari fluida panas pada *heat exchanger* E-101.
4. Besar nilai temperatur outlet dari fluida panas pada *heat exchanger* E-109 akan menjadi besar temperatur inlet dari fluida panas pada *heat exchanger* E-131.

3.2.3. Perancangan Genetic Algorithm

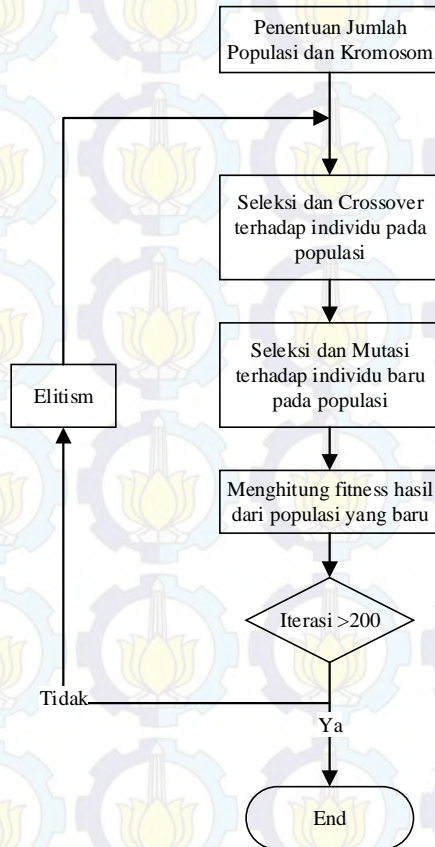
Genetic algorithm digunakan sebagai optimizer pada penelitian ini. Pemilihan *genetic algorithm* sebagai optimizer didasarkan pada cara kerja dari *genetic algorithm* yang dinilai lebih bagus daripada model optimasi stokastik lainnya. Hal ini dikarenakan pada proses GA, dilakukan seleksi individu menggunakan metode *roulette wheel* hingga didapatkan hasil yang terbaik. Selain itu digunakan *elitism* untuk menjaga agar kromosom yang baik tidak punah. Perancangan *genetic algorithm* (GA) dilakukan pada software MATLAB.

Di dalam satu HEN, terdapat 10 HE yang dikaji. Pada setiap HE terdapat 10 bit genotip atau dapat direpresentasikan dengan 1024 fenotip (*overall heat transfer coefficient*). Sehingga dalam satu kromosom terdapat 100 bit genotip dimana 10 bit pertama terdapat pada HE pertama, 10 bit kedua pada HE kedua, dan seterusnya. Kromosom yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 3.3**. Kromosom GA Pada *optimizer* digunakan *elitism* sebesar 5%, probabilitas *crossover* sebesar 0,7 dan probabilitas *mutation* sebesar 0,001.

HE-E101 10 bit Genotip	HE-E102 10 bit Genotip	HE-E103 10 bit Genotip	HE-E131 10 bit Genotip	HE-E104 10 bit Genotip	HE-E105 10 bit Genotip	HE-E106 10 bit Genotip	HE-E107 10 bit Genotip	HE-E108 10 bit Genotip	HE-E109 10 bit Genotip
0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U	0-1024 U

Gambar 3.3. Kromosom GA

Perancangan ini dilakukan dengan beberapa tahap, yaitu tahap seleksi individu dan *crossover*, seleksi individu dan *mutation*, perhitungan fitness hasil dari populasi yang baru, serta *elitism*. Flow chart dari tahap perancangan GA dapat dilihat pada **Gambar 3.4**



Gambar 3.4. Perancangan Genetic Algorithm

3.2.4. Optimasi HEN

Optimasi HEN dilakukan dengan menggabungkan hasil model HEN yang sudah di berikan batasan-batasan dengan hasil

rancangan *genetic algorithm*. Optimasi dilakukan dengan menggunakan 3 skenario yang berbeda. Perbedaan dari setiap skenario adalah *overall heat transfer coefficient* (U) dengan batasan-batasan yang berbeda tanpa mengubah desain dari *heat exchanger*. Hasil dari ketiga skenario optimasi HEN kemudian dibandingkan dengan model HEN dan dianalisis.

Pada optimasi skenario pertama, nilai U yang digunakan adalah nilai U yang tidak diberikan batasan. Pada optimasi ini, nilai U akan meningkat hingga maksimum, tetapi tidak menutup kemungkinan bahwa nilai U yang dihasilkan memiliki nilai yang minimum. Pada optimasi skenario kedua, nilai U yang digunakan diberikan batasan nilai minimum, yaitu nilai U pada data desain masing-masing HE dan tidak diberikan batasan nilai maksimum pada U. Pada optimasi skenario ketiga, nilai U yang digunakan dibatasi oleh teknologi yang sudah ada. Teknologi yang akan dijadikan batasan pada optimasi ketiga adalah teknologi *internal fin*, *twisted tape inserts*, *coiled wire inserts*, dan *helical baffle*.

Teknologi yang digunakan pada setiap skenario ketiga memiliki batasan yang perlu diperhatikan. Pada teknologi *internal fin* digunakan Reynold number yang berkisar antara 2.6×10^4 hingga 7.9×10^4 sehingga didapatkan peningkatan U sebesar 52% [11]. Pada teknologi *twisted tape insert* digunakan nilai maksimum Nusselt number sebesar 201.75 dan Reynold number sebesar 7.77×10^4 sehingga didapatkan peningkatan U sebesar 35.5% [12]. Pada teknologi *coiled wire insert* digunakan Reynold number sebesar 1300 sehingga didapatkan peningkatan U sebesar 300% [15]. Pada teknologi *helical baffle* digunakan Reynold number diantara 50 hingga 1000 sehingga didapatkan peningkatan U sebesar 75% [14].

Optimasi dilakukan dengan memaksimalkan panas yang dihasilkan oleh HEN. Fungsi objektif yang digunakan pada optimasi ini dapat dilihat pada persamaan berikut,

$$J = \sum_{n=1}^{N_E} Q_n$$

dimana,

$$Q_n = f_1(m_{c/h}, cp_{c/h}, Ti_{c/h}, To_{c/h}, U, n)$$

$$Un = f_2(Q, A, Ti_{c/h}, To_{c/h}, n)$$

dengan konstrain:

$$Tco_{(n)} = Tci_{(n+1)}$$

$$Tho_{(6)} = Thi_{(1)}$$

$$Tho_{(10)} = Thi_{(4)}$$

$$\text{Optimasi } U \text{ tanpa batas} \rightarrow 0 \leq Un \leq \infty$$

$$\text{Optimasi } U \text{ tanpa batas, dengan batas minimum adalah } U \text{ data desain} \rightarrow Un_{DD} \leq Un \leq \infty$$

$$\text{Optimasi } U \text{ dengan batasan teknologi} \rightarrow Un_{DD} \leq Un \leq U_{Tech}$$

Fungsi f_1 dan f_2 merupakan persamaan model HE pada HEN. N_E merupakan jumlah dari HE yang terdapat pada HEN dan n merupakan urutan dari HE. Un_{DD} merupakan nilai *overall heat transfer coefficient* HE yang terdapat pada data design, sedangkan U_{Tech} merupakan nilai *overall heat transfer coefficient* dengan batasan teknologi yang sudah ada.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan HEN dan Validasi HE

Penelitian ini dimulai dengan melakukan pengecekan data desain menggunakan persamaan *energy balance*. Prinsip dari tahap ini adalah besar laju aliran panas yang diberikan oleh *heat exchanger* bagian *tube* sama dengan laju aliran panas yang diberikan pada bagian *shell*, dengan asumsi bahwa tidak ada panas yang hilang selama proses berlangsung. Setelah perhitungan dilakukan diketahui bahwa semua *heat exchanger* telah memiliki besar panas pada sisi *tube* dan *shell* yang sama. Setelah semua data divalidasi, maka dilakukan pemodelan HEN.

Pada pemodelan HEN, digunakan persamaan *steady state heat exchanger* dan temperatur output dari *heat exchanger* dengan asumsi *heat exchanger* dalam keadaan *steady state*, tidak ada panas yang terbuang, dan nilai *properties* yang digunakan diambil nilai rata-rata antara nilai pada inlet dan outlet *heat exchanger*. Dengan memasukkan data desain yang ada, didapatkan hasil temperatur keluaran pada masing-masing *heat exchanger*. Hasil temperatur tersebut kemudian dibandingkan dengan temperatur yang terdapat pada PFD *heat exchanger*. Hasil perbandingan dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1. Perbandingan nilai temperatur outlet dari pemodelan HE dan data desain HE

No	HE	Model (°C)		Data Desain (°C)		Selisih	
		Tco	Tho	Tco	Tho	Tco	Tho
1	E101	66.0	104.0	66.0	104.0	0.0	0.0
2	E102	88.0	91.0	88.0	91.0	0.0	0.0
3	E103	115.0	122.0	115.0	122.0	0.0	0.0
4	E131	129.0	145.0	129.0	145.0	0.0	0.0
5	E104	152.0	155.0	152.0	155.0	0.0	0.0
6	E105	161.0	169.0	161.0	169.0	0.0	0.0

Tabel 4.1. Perbandingan nilai temperatur outlet dari pemodelan HE dan data desain HE (lanjutan)

No	HE	Model (°C)		Data Desain (°C)		Selisih	
		Tco	Tho	Tco	Tho	Tco	Tho
7	E106	174.0	174.0	174.0	174.0	0.0	0.0
8	E107	188.0	197.0	188.0	197.0	0.0	0.0
9	E108	218.0	220.0	218.0	220.0	0.0	0.0
10	E109	246.0	246.0	246.0	246.0	0.0	0.0

Berdasarkan data pada **Tabel 4.1**, diketahui bahwa tidak ada error yang dihasilkan, sehingga model ini dapat dinyatakan sudah benar. Setelah model ini dinyatakan benar, dimasukkan beberapa batasan-batasan pada model ini untuk dilakukan simulasi. Batasan-batasan tersebut adalah

1. Besar laju aliran massa pada setiap *heat exchanger* sama dengan laju aliran massa pada *heat exchanger* E-101B.
2. Besar temperatur outlet fluida dingin pada *heat exchanger* akan menjadi besar temperatur inlet fluida dingin pada *heat exchanger* selanjutnya.
3. Besar nilai temperatur dari outlet fluida panas pada *heat exchanger* E-105 akan menjadi besar temperatur inlet dari fluida panas pada *heat exchanger* E-101.
4. Besar nilai temperatur outlet dari fluida panas pada *heat exchanger* E-109 akan menjadi besar temperatur inlet dari fluida panas pada *heat exchanger* E-131.

Hasil dari simulasi model HEN yang telah diberikan batasan, dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2. Hasil simulasi model HEN dengan batasan

No	HE	Tci (°C)	Tco (°C)	Thi (°C)	Tho (°C)	U (Watt/ M ² .Hr.°C)	Q (MW)
1	E-101	32.0	66.0	169	104.0	432.87	10.123
2	E-102	66.0	88.0	121	91.0	466.60	7.275
3	E-103	88.0	126.6	187	129.5	434.15	13.861

Tabel 4.2. Hasil simulasi model HEN dengan batasan (lanjutan)

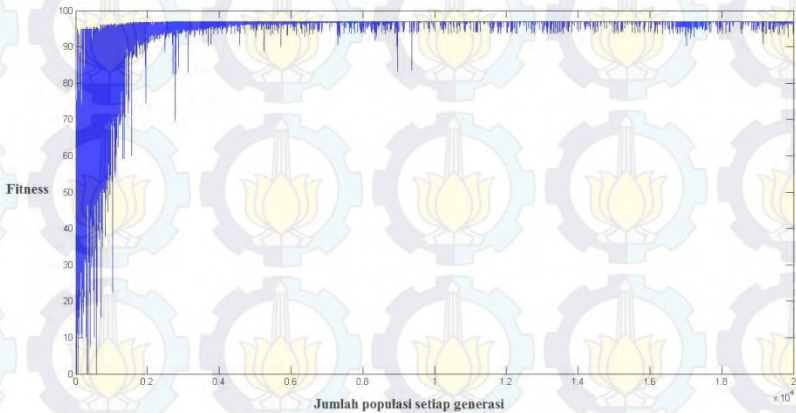
No	HE	Tci (°C)	Tco (°C)	Thi (°C)	Tho (°C)	U (Watt/ M ² .Hr.°C)	Q (MW)
4	E-131	126.6	143.0	247	154.7	179.45	6.399
5	E-104	143.0	163.3	193	165.5	444.27	7.647
6	E-105	163.3	170.6	212	177.1	388.44	3.012
7	E-106	170.6	182.6	277	182.5	297.73	4.661
8	E-107	182.6	195.7	305	204.1	295.29	5.409
9	E-108	195.7	222.5	260	224.3	410.54	11.618
10	E-109	222.5	249.5	336	249.5	268.54	11.804
Total							81.809

4.2. Optimasi HEN

Hasil dari simulasi model HEN yang sudah diberikan batasan-batasan, kemudian dioptimasi dengan menggunakan *genetic algorithm* (GA). Optimasi GA dilakukan untuk menentukan nilai *overall heat transfer coefficient* (U) yang optimal. Optimasi ini menggunakan jumlah populasi sebesar 100, maksimum generasi sebesar 200, jumlah kromosom sebesar 100, *elitism* sebesar 5%, probabilitas *crossover* sebesar 0,7 dan probabilitas *mutation* sebesar 0,001.

Optimasi dilakukan dengan menggunakan tiga skenario U yang berbeda. Optimasi skenario pertama dilakukan dengan tidak memberikan batasan teknologi pada penentuan nilai U, sehingga besar U yang dihasilkan bisa saja lebih kecil maupun lebih besar daripada nilai U pada data desain. Optimasi skenario kedua dilakukan dengan tidak memberikan batasan teknologi terhadap peningkatan U, tetapi hasil optimasi U tidak boleh lebih kecil daripada data desain. Pada optimasi skenario ketiga, peningkatan besar U dibatasi dengan teknologi yang sudah ada. Batasan teknologi yang diberikan adalah teknologi *internal fin*, *twisted tape inserts*, *coiled wire inserts*, dan *helical baffle*. Pemilihan

[illegible]

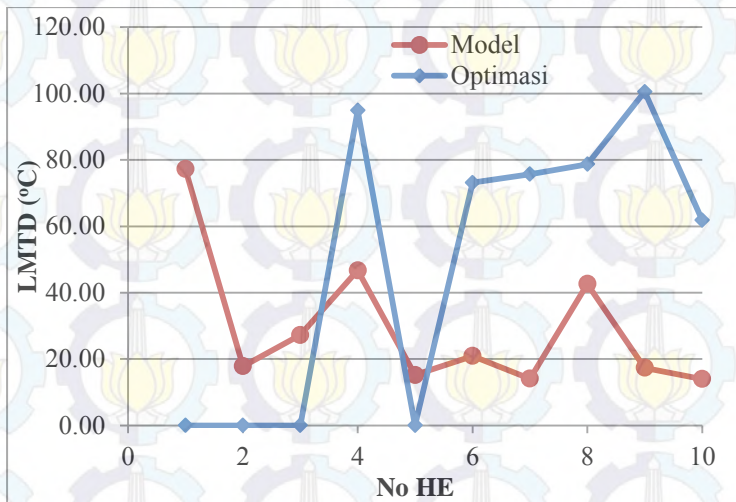


Gambar 4.1. Hasil perhitungan *fitness* optimasi skenario pertama

Hasil data yang didapatkan pada **Tabel 4.3.** dibandingkan dengan hasil data simulasi model HEN yang telah diberikan batasan (**Tabel 4.2.**). Hasil perbandingan nilai LMTD, *overall heat transfer coefficient* (U), dan panas yang dihasilkan (Q) dari kedua model dapat dilihat pada **Tabel 4.4-4.6.** dan **Gambar 4.2-4.4.**

Tabel 4.4. Perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal

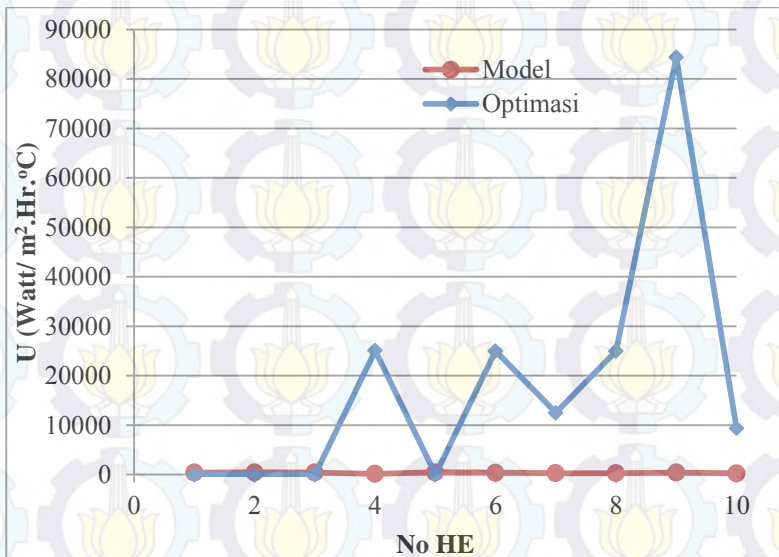
No	HE	LMTD Optimasi	LMTD desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	0.00	77.26	-77.26	-100.00%
2	E-102	0.00	17.86	-17.86	-100.00%
3	E-103	0.00	27.22	-27.22	-100.00%
4	E-131	94.89	46.74	48.15	103.02%
5	E-104	0.00	15.20	-15.20	-100.00%
6	E-105	73.16	20.90	52.26	250.04%
7	E-106	75.72	14.10	61.62	437.06%
8	E-107	78.68	42.61	36.08	84.67%
9	E-108	100.55	17.36	83.19	479.11%
10	E-109	61.82	13.99	47.83	341.96%



Gambar 4.2. Grafik perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal

Tabel 4.5. Perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal

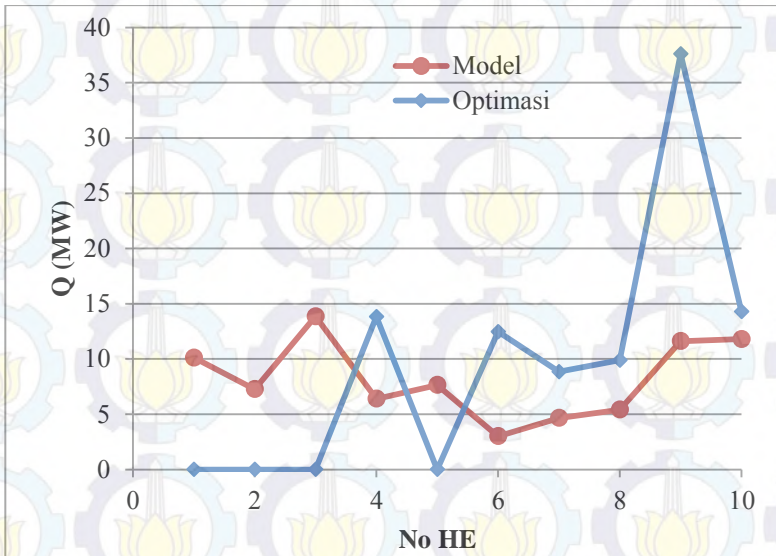
No	HE	U Optimasi	U desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	0.00	432.87	-432.87	-100.00%
2	E-102	0.00	466.60	-466.60	-100.00%
3	E-103	0.00	434.15	-434.15	-100.00%
4	E-131	25097.66	179.45	24918.21	13885.80%
5	E-104	0.00	444.27	-444.27	-100.00%
6	E-105	25000.00	388.44	24611.56	6335.97%
7	E-106	12500.00	297.73	12202.27	4098.46%
8	E-107	25000.00	295.29	24704.71	8366.37%
9	E-108	84375.00	410.54	83964.46	20452.25%
10	E-109	9375.00	268.54	9106.46	3391.14%



Gambar 4.3. Grafik perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal

Tabel 4.6. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal

No	HE	Q Optimasi	Q desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	0.000	10.123	-10.123	-100.00%
2	E-102	0.000	7.275	-7.275	-100.00%
3	E-103	0.000	13.861	-13.861	-100.00%
4	E-131	13.826	6.399	7.427	116.05%
5	E-104	0.000	7.647	-7.647	-100.00%
6	E-105	12.474	3.012	9.462	314.13%
7	E-106	8.842	4.661	4.181	89.72%
8	E-107	9.896	5.409	4.487	82.96%
9	E-108	37.603	11.618	25.986	223.68%
10	E-109	14.282	11.804	2.478	20.99%



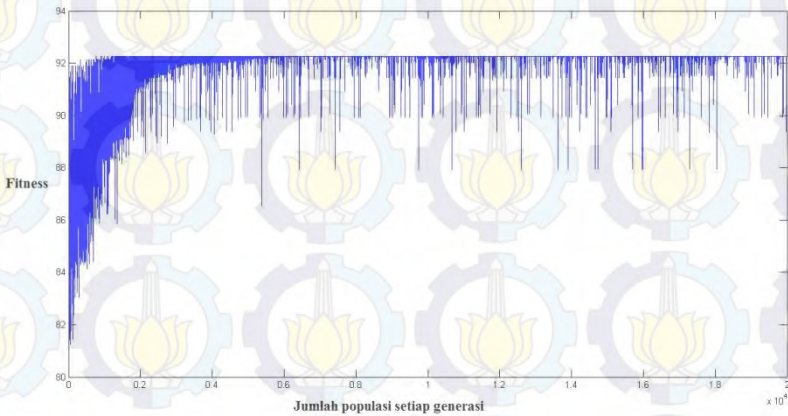
Gambar 4.4. Grafik perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi skenario pertama dengan simulasi model awal

Berdasarkan hasil perbandingan data antara hasil optimasi skenario pertama dengan hasil simulasi desain awal, pada HE pertama, kedua, ketiga, dan kelima tidak terjadi peningkatan. Diketahui bahwa nilai LMTD pada optimasi skenario pertama (**Tabel 4.4.**), peningkatan terbesar terdapat pada *heat exchanger* kesembilan, yaitu sebesar 479.11%. Sedangkan peningkatan terkecil terdapat pada *heat exchanger* kedelapan, yaitu sebesar 84.67%. Selain itu, diketahui bahwa peningkatan terbesar nilai U pada optimasi skenario pertama (**Tabel 4.5.**), terdapat pada *heat exchanger* kesembilan, yaitu sebesar 20452.25% dan peningkatan terkecil terdapat pada HE kesepuluh, yaitu sebesar 3391.14%. Diketahui juga bahwa terjadi peningkatan terbesar panas yang dihasilkan (**Tabel 4.6.**) terdapat pada *heat exchanger* keenam, yaitu sebesar 314.13%. Sedangkan peningkatan terkecil terdapat pada *heat exchanger* kesepuluh, yaitu sebesar 20.99%. Pada *heat exchanger* E-105 terjadi penurunan nilai LMTD sebesar 8,35%.

4.4. Hasil Optimasi Skenario Kedua

Tabel 4.7. Hasil optimasi kedua

[illegible]

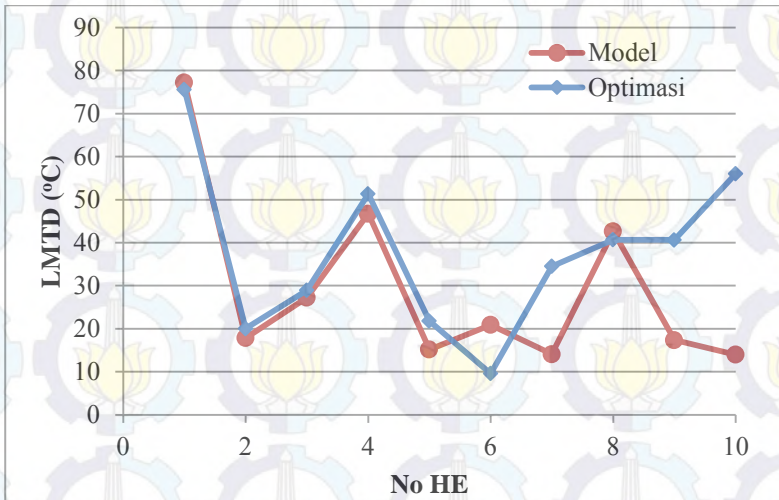


Gambar 4.5. Perhitungan *fitness* pada optimasi skenario kedua

Hasil data yang didapatkan pada **Tabel 4.7.** dibandingkan dengan hasil data simulasi model HEN yang telah diberikan batasan (**Tabel 4.2.**). Hasil perbandingan nilai LMTD, *overall heat transfer coefficient* (U), dan panas yang dihasilkan (Q) dari kedua model dapat dilihat pada **Tabel 4.8-4.10** dan **Gambar 4.6-4.8.**

Tabel 4.8. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal

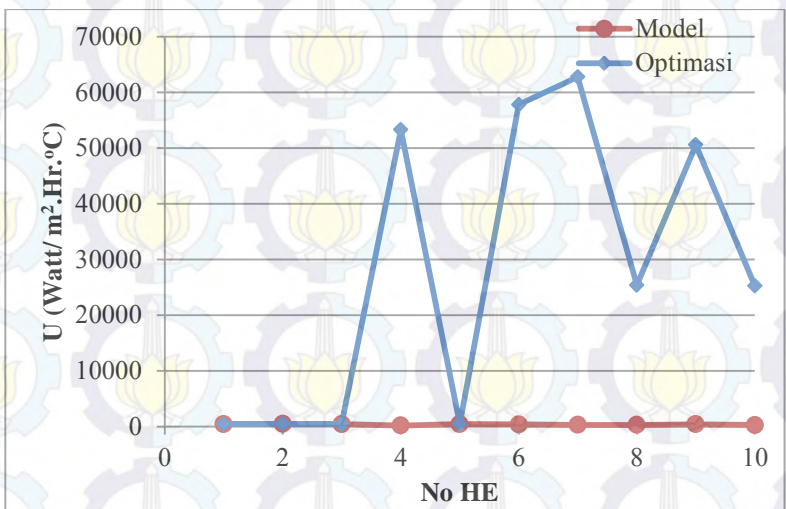
No	HE	LMTD Optimasi	LMTD desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	75.60	77.26	-1.66	-2.15%
2	E-102	20.05	17.86	2.19	12.26%
3	E-103	28.94	27.22	1.72	6.31%
4	E-131	51.33	46.74	4.59	9.81%
5	E-104	21.78	15.20	6.59	43.35%
6	E-105	9.61	20.90	-11.30	-54.04%
7	E-106	34.50	14.10	20.40	144.72%
8	E-107	40.69	42.61	-1.92	-4.50%
9	E-108	40.66	17.36	23.30	134.18%
10	E-109	56.00	13.99	42.02	300.39%



Gambar 4.6. Grafik perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal

Tabel 4.9. Perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal

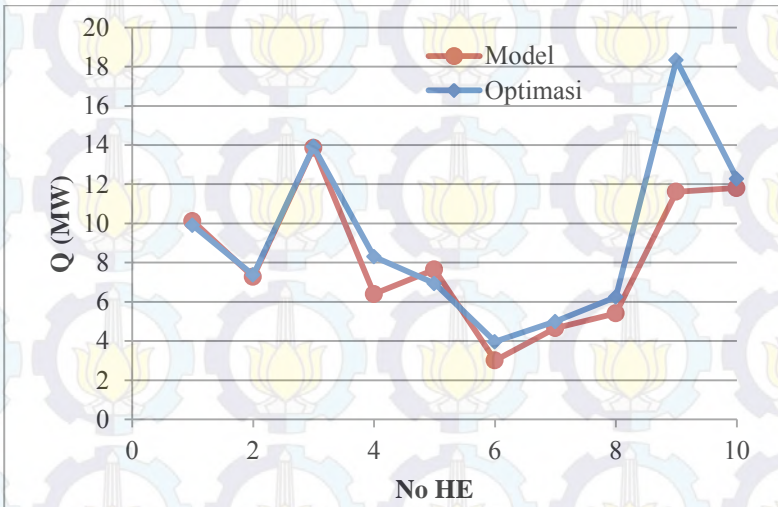
No	HE	U Optimasi	U desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	432.87	432.87	0.00	0.00%
2	E-102	466.60	466.60	0.00	0.00%
3	E-103	434.15	434.15	0.00	0.00%
4	E-131	53304.45	179.45	53125.00	29604.18%
5	E-104	444.27	444.27	0.00	0.00%
6	E-105	57810.32	388.44	57421.87	14782.61%
7	E-106	62797.73	297.73	62500.00	20992.32%
8	E-107	25392.95	295.29	25097.66	8499.44%
9	E-108	50605.85	410.54	50195.31	12226.69%
10	E-109	25268.54	268.54	25000.00	9309.71%



Gambar 4.7. Grafik perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal

Tabel 4.10. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi kedua dengan simulasi model awal

No	HE	Q Optimasi	Q desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	9.905	10.123	-0.218	-2.15%
2	E-102	7.372	7.275	0.097	1.33%
3	E-103	13.923	13.861	0.061	0.44%
4	E-131	8.305	6.399	1.905	29.77%
5	E-104	6.941	7.647	-0.705	-9.22%
6	E-105	3.965	3.012	0.953	31.63%
7	E-106	4.998	4.661	0.337	7.24%
8	E-107	6.247	5.409	0.838	15.49%
9	E-108	18.336	11.618	6.718	57.83%
10	E-109	12.277	11.804	0.473	4.01%



Gambar 4.8. Grafik perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi skenario kedua dengan simulasi model awal

Berdasarkan hasil perbandingan data antara hasil optimasi skenario kedua dengan hasil simulasi desain awal, diketahui bahwa nilai LMTD pada optimasi kedua (**Tabel 4.8**) terdapat peningkatan pada HE pertama, keenam, dan kedelapan. Peningkatan paling besar terdapat pada HE kesepuluh, yaitu 300.39% dan yang terkecil terdapat pada HE ketiga yaitu 6.31%. Selain itu, diketahui juga bahwa peningkatan nilai U pada optimasi skenario kedua (**Tabel 4.9**) terjadi peningkatan pada semua *heat exchanger* kecuali HE pertama, kedua, ketiga, dan keempat. Peningkatan terbesar ditemukan pada *heat exchanger* keempat, yaitu sebesar 29604.18% dan peningkatan terkecil terdapat pada *heat exchanger* kedelapan, yaitu sebesar 8499.44%. Diketahui juga bahwa terjadi peningkatan panas yang dihasilkan (**Tabel 4.10**) terdapat pada semua *heat exchanger* kecuali pada HE kedua dan ketiga. Peningkatan Q terbesar terdapat pada *heat exchanger* kelima, yaitu sebesar 27.74% dan peningkatan terkecil sebesar 0.54% pada *heat exchanger* ketujuh. Hasil dari optimasi

ini dapat menghasilkan *heat recovery* pada HEN sebesar 10.460 MW atau 9.14%.

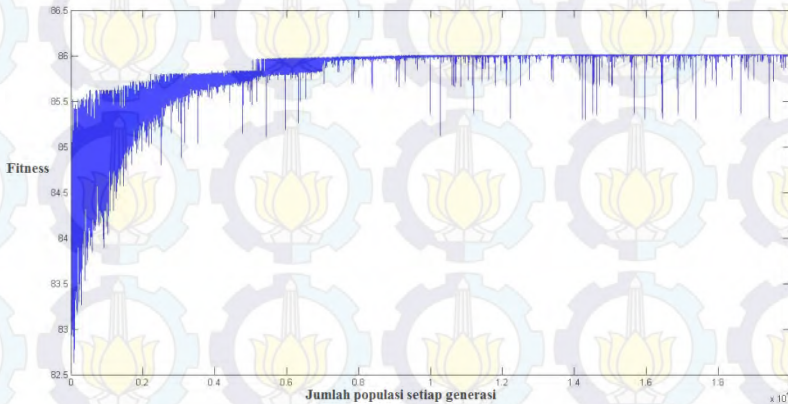
4.5. Hasil Optimasi Skenario Ketiga

Optimasi skenario ketiga dilakukan dengan menggunakan GA dan diberikan batasan teknologi terhadap U. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan teknologi yang sudah ada saat ini sehingga apabila akan dilakukan retrofit, maka teknologi yang akan digunakan sudah dapat ditentukan dengan teknologi yang sudah ada. Teknologi tersebut adalah *internal fin*, *twisted tape inserts*, *coiled wire inserts*, dan *helical baffle*.

Hasil dari optimasi dengan teknologi *internal fin* dapat dilihat pada **Tabel 4.11**. Hasil perhitungan *fitness function* pada optimasi dengan teknologi *internal fin* dapat dilihat pada **Gambar 4.9**.

Tabel 4.11. Hasil optimasi dengan *internal fin*

[illegible]

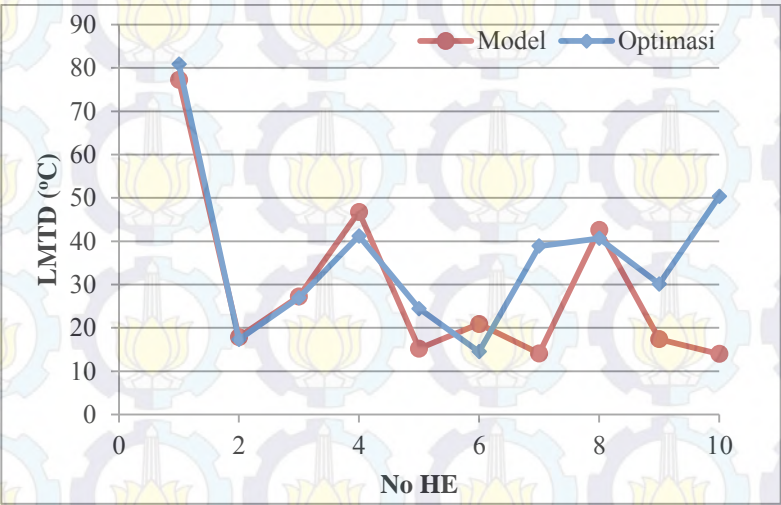


Gambar 4.9. Hasil perhitungan *fitness* pada optimasi dengan *internal fin*

Hasil data yang didapatkan pada **Tabel 4.11** dibandingkan dengan hasil data simulasi model HEN yang telah diberikan batasan (**Tabel 4.2**). Hasil perbandingan nilai LMTD, *overall heat transfer coefficient* (U), dan panas yang dihasilkan (Q) dari kedua model dapat dilihat pada **Tabel 4.12-4.14** dan **Gambar 4.10-4.12**.

Tabel 4.12. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi *internal fin* dengan simulasi model awal

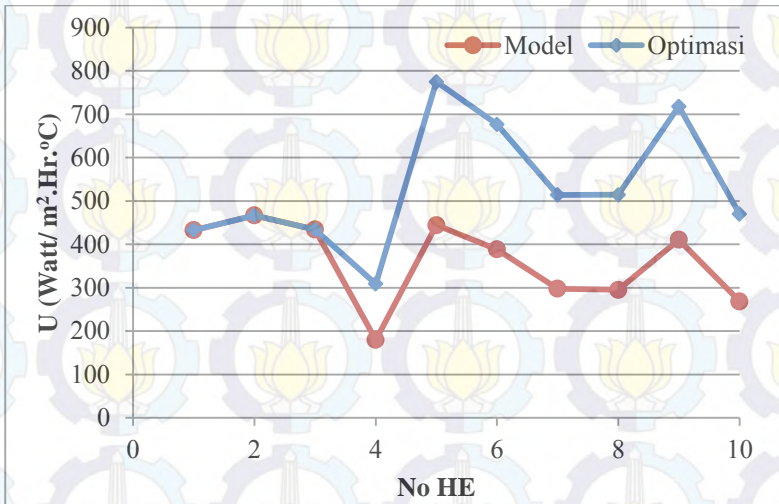
No	HE	LMTD Optimasi	LMTD desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	81.08	77.26	3.82	4.95%
2	E-102	17.20	17.86	-0.66	-3.70%
3	E-103	24.81	27.22	-2.41	-8.86%
4	E-131	35.24	46.74	-11.50	-24.61%
5	E-104	21.62	15.20	6.42	42.26%
6	E-105	11.04	20.90	-9.86	-47.16%
7	E-106	37.07	14.10	22.97	162.94%
8	E-107	35.89	42.61	-6.72	-15.77%
9	E-108	27.09	17.36	9.73	56.02%
10	E-109	46.70	13.99	32.71	233.85%



Gambar 4.10. Grafik perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi *internal fin* dengan simulasi model awal

Tabel 4.13. Perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi *internal fin* dengan simulasi model awal.

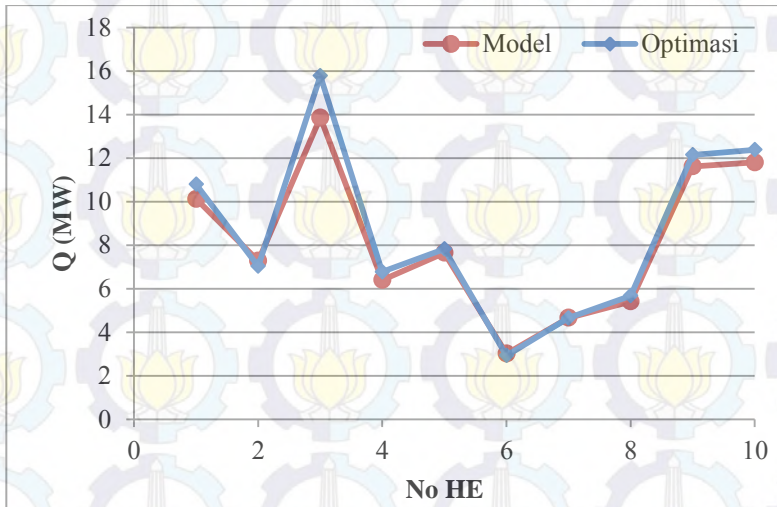
No	HE	U Optimasi	U desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	432.87	432.87	0.00	0.00%
2	E-102	467.78	466.60	1.19	0.25%
3	E-103	441.65	434.15	7.50	1.73%
4	E-131	272.67	179.45	93.22	51.95%
5	E-104	675.06	444.27	230.80	51.95%
6	E-105	590.23	388.44	201.79	51.95%
7	E-106	452.25	297.73	154.52	51.90%
8	E-107	448.69	295.29	153.40	51.95%
9	E-108	623.81	410.54	213.27	51.95%
10	E-109	408.04	268.54	139.51	51.95%



Gambar 4.11. Grafik perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi *internal fin* dengan simulasi model awal

Tabel 4.14. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *internal fin* dengan simulasi model awal

No	HE	Q Optimasi	Q desain awal	Selisih	Persentase
1	E-101	10.793	10.123	0.670	6.62%
2	E-102	7.027	7.275	-0.248	-3.41%
3	E-103	15.779	13.861	1.917	13.83%
4	E-131	6.770	6.399	0.371	5.79%
5	E-104	7.825	7.647	0.178	2.32%
6	E-105	2.927	3.012	-0.085	-2.81%
7	E-106	4.651	4.661	-0.009	-0.20%
8	E-107	5.676	5.409	0.267	4.94%
9	E-108	12.149	11.618	0.531	4.57%
10	E-109	12.384	11.804	0.580	4.91%



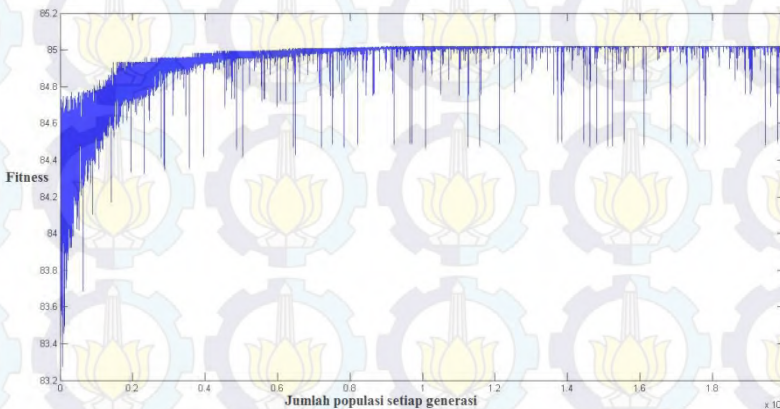
Gambar 4.12. Grafik perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *internal fin* dengan simulasi model awal

Berdasarkan hasil perbandingan data antara hasil optimasi *internal fin* dengan hasil simulasi desain awal, diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai LMTD (**Tabel 4.12**) pada HE pertama, kelima, ketujuh kesembilan, dan kesepuluh. Peningkatan terbesar terdapat pada *heat exchanger* kesepuluh, yaitu sebesar 233.85%. Sedangkan peningkatan terkecil terdapat pada *heat exchanger* pertama, yaitu sebesar 4.95%. Diketahui juga bahwa peningkatan nilai U (**Tabel 4.13**) ditemukan pada semua *heat exchanger* kecuali HE pertama. Peningkatan nilai U terbesar adalah 51.95% yang terdapat pada HE keempat hingga keenam dan kedelapan hingga kesepuluh. Peningkatan U terkecil terdapat pada HE kedua, yaitu sebesar 0.25%. Selain itu, diketahui bahwa terjadi peningkatan panas yang dihasilkan (**Tabel 4.14**) terdapat pada semua *heat exchanger* kecuali pada HE kedua, keenam, dan ketujuh. Peningkatan Q terbesar terdapat pada *heat exchanger* ketiga, yaitu sebesar 13.83% dan peningkatan terkecil sebesar 2.32% pada *heat exchanger* kelima. Hasil dari optimasi ini dapat menghasilkan *heat recovery* pada HEN sebesar 4.172 MW atau 3.60%.

Hasil dari optimasi dengan teknologi *twisted tape insert* dapat dilihat pada **Tabel 4.15**. Hasil perhitungan *fitness function* pada optimasi dengan teknologi *twisted tape insert* dapat dilihat pada **Gambar 4.13**.

Tabel 4.15. Hasil optimasi dengan *twisted tape insert*

No	HE	Tci	Tco	Thi	Tho	Uc	Q
1	E-101	32.0	68.3	178.2	108.9	432.87	10.801
2	E-102	68.3	89.4	121.0	92.2	466.60	6.974
3	E-103	89.4	133.1	187.0	121.7	588.12	15.732
4	E-131	133.1	150.4	246.4	149.5	243.10	6.722
5	E-104	150.4	170.4	193.0	165.9	601.83	7.529
6	E-105	170.4	177.5	212.0	178.2	526.21	2.918
7	E-106	177.5	189.4	277.0	182.8	403.32	4.648
8	E-107	189.4	203.0	305.0	200.7	400.02	5.592
9	E-108	203.0	230.4	260.0	223.5	556.14	11.880
10	E-109	230.4	258.4	336.0	246.4	363.78	12.223
Total						85.020	

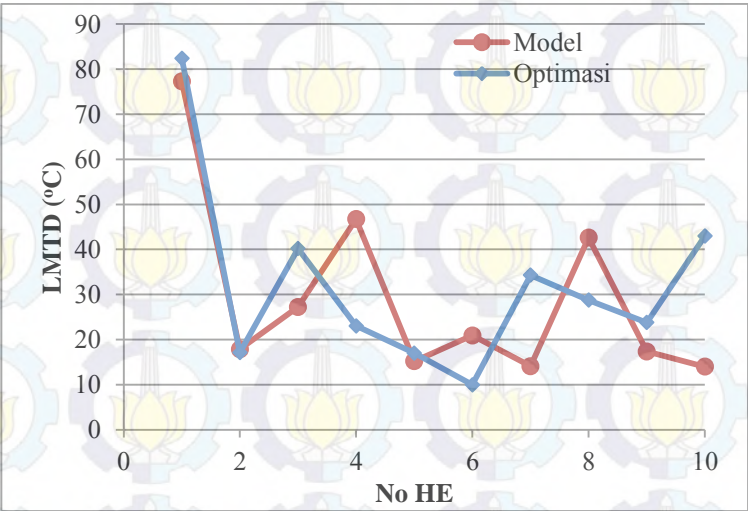


Gambar 4.13. Hasil perhitungan *fitness* pada optimasi dengan *twisted tape insert*

Perbandingan antara optimasi *twisted tape insert* dengan model dapat dilihat pada **Tabel 4.16-4.18** dan **Gambar 4.14-4.16**.

Tabel 4.16. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan simulasi model awal

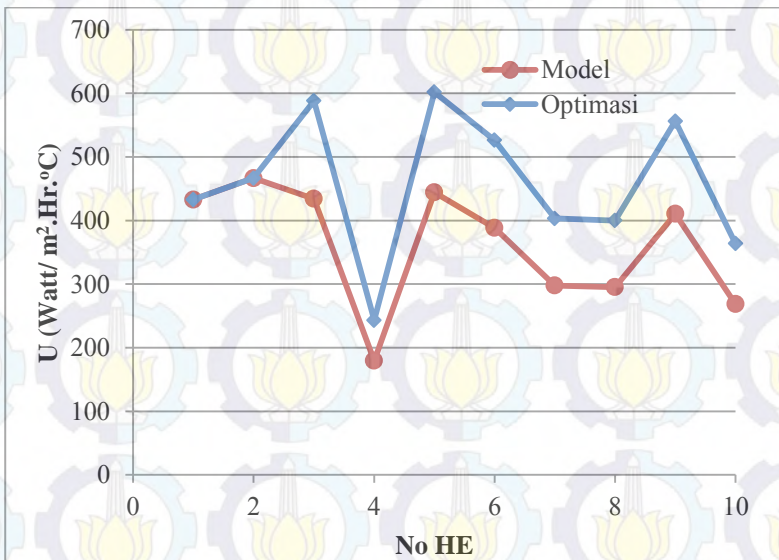
No	HE	LMTD Optimasi	LMTD design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	82.43	77.26	5.18	6.70%
2	E-102	17.12	17.86	-0.74	-4.14%
3	E-103	40.19	27.22	12.97	47.65%
4	E-131	23.02	46.74	-23.72	-50.75%
5	E-104	16.98	15.20	1.79	11.75%
6	E-105	9.97	20.90	-10.93	-52.28%
7	E-106	34.28	14.10	20.18	143.16%
8	E-107	28.76	42.61	-13.84	-32.49%
9	E-108	23.77	17.36	6.40	36.88%
10	E-109	42.96	13.99	28.98	207.16%



Gambar 4.14. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan simulasi model awal

Tabel 4.17. Perbandingan nilai U (Watt/ M^2 .Hr. $^{\circ}C$) antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan simulasi model awal.

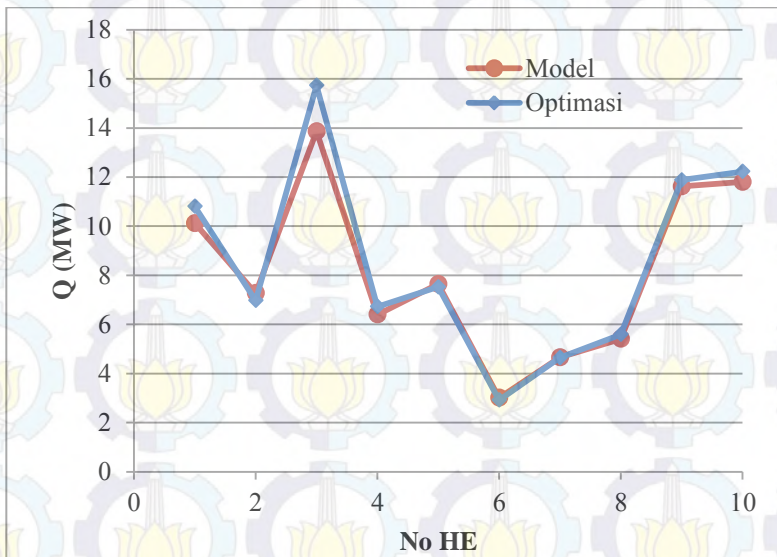
No	HE	U Optimasi	U design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	432.87	432.87	0.00	0.00%
2	E-102	466.60	466.60	0.00	0.00%
3	E-103	588.12	434.15	153.97	35.47%
4	E-131	243.10	179.45	63.65	35.47%
5	E-104	601.83	444.27	157.56	35.47%
6	E-105	526.21	388.44	137.76	35.47%
7	E-106	403.32	297.73	105.59	35.46%
8	E-107	400.02	295.29	104.73	35.47%
9	E-108	556.14	410.54	145.60	35.47%
10	E-109	363.78	268.54	95.24	35.47%



Gambar 4.15. Perbandingan nilai U (Watt/ M^2 .Hr. $^{\circ}C$) antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan simulasi model awal.

Tabel 4.18. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan simulasi model awal

No	HE	Q Optimasi	Q design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	10.801	10.123	0.678	6.70%
2	E-102	6.974	7.275	-0.301	-4.14%
3	E-103	15.732	13.861	1.871	13.49%
4	E-131	6.722	6.399	0.323	5.04%
5	E-104	7.529	7.647	-0.118	-1.55%
6	E-105	2.918	3.012	-0.094	-3.12%
7	E-106	4.648	4.661	-0.012	-0.27%
8	E-107	5.592	5.409	0.183	3.39%
9	E-108	11.880	11.618	0.262	2.26%
10	E-109	12.223	11.804	0.419	3.55%

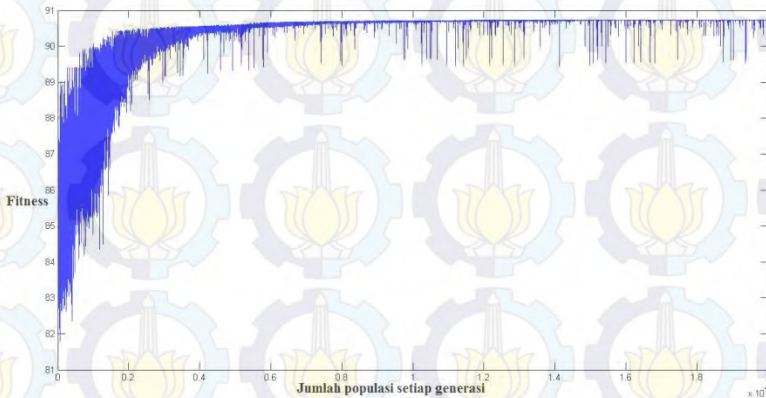


Gambar 4.16. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan simulasi model awal

Berdasarkan hasil perbandingan data antara hasil optimasi *twisted tape insert* dengan hasil simulasi desain awal, diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai LMTD (**Tabel.4.16**) pada semua

Hasil optimasi dengan teknologi *coiled wire insert* dapat dilihat pada **Tabel 4.19**. Hasil perhitungan *fitness function* pada optimasi dengan teknologi *coiled wire insert* dapat dilihat pada **Gambar 4.17**.

[illegible][illegible]

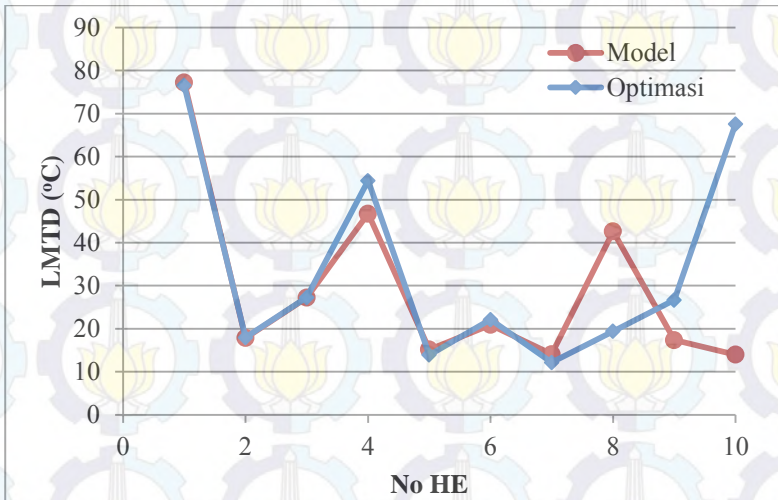


Gambar 4.17. Hasil perhitungan *fitness* pada optimasi dengan *coiled wire insert*

Hasil perbandingan dari optimasi menggunakan teknologi *coiled wire insert* dengan model dapat dilihat pada **Tabel 4.20-4.22** dan **Gambar 4.18-4.20**.

Tabel 4.20. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan simulasi model awal

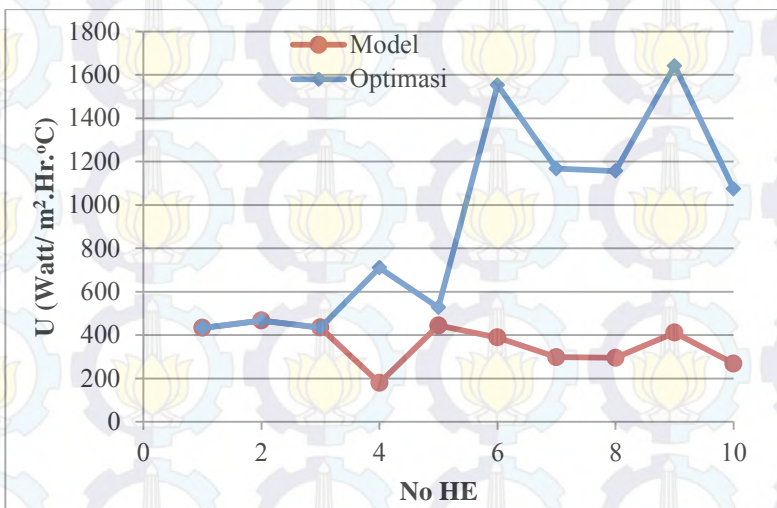
No	HE	LMTD Optimasi	LMTD design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	76.55	77.26	-0.71	-0.92%
2	E-102	17.96	17.86	0.10	0.56%
3	E-103	27.27	27.22	0.05	0.19%
4	E-131	54.41	46.74	7.67	16.42%
5	E-104	13.91	15.20	-1.28	-8.45%
6	E-105	22.13	20.90	1.23	5.90%
7	E-106	12.16	14.10	-1.94	-13.78%
8	E-107	19.42	42.61	-23.18	-54.41%
9	E-108	26.65	17.36	9.29	53.52%
10	E-109	67.58	13.99	53.59	383.18%



Gambar 4.18. Perbandingan nilai LMTD (°C) antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan simulasi model awal

Tabel 4.21. Perbandingan nilai U (Watt/ M².Hr.°C) antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan simulasi model awal.

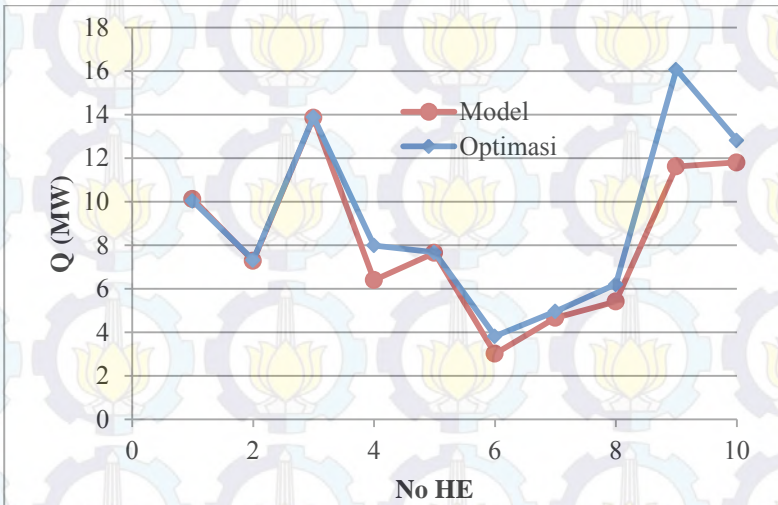
No	HE	U Optimasi	U design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	432.87	432.87	0.00	0.00%
2	E-102	466.60	466.60	0.00	0.00%
3	E-103	434.15	434.15	0.00	0.00%
4	E-131	710.44	179.45	530.99	295.90%
5	E-104	527.57	444.27	83.30	18.75%
6	E-105	1552.63	388.44	1164.19	299.71%
7	E-106	1167.36	297.73	869.63	292.09%
8	E-107	1156.06	295.29	860.78	291.51%
9	E-108	1640.96	410.54	1230.42	299.71%
10	E-109	1073.36	268.54	804.83	299.71%



Gambar 4.19. Perbandingan nilai U (Watt/ M^2 .Hr.°C) antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan simulasi model awal.

Tabel 4.22. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan simulasi model awal.

No	HE	Q Optimasi	Q design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	10.030	10.123	-0.093	-0.91%
2	E-102	7.316	7.275	0.041	0.57%
3	E-103	13.888	13.861	0.026	0.19%
4	E-131	7.981	6.399	1.582	24.72%
5	E-104	7.667	7.647	0.020	0.26%
6	E-105	3.819	3.012	0.807	26.78%
7	E-106	4.952	4.661	0.292	6.26%
8	E-107	6.195	5.409	0.786	14.54%
9	E-108	16.067	11.618	4.450	38.30%
10	E-109	12.818	11.804	1.014	8.59%



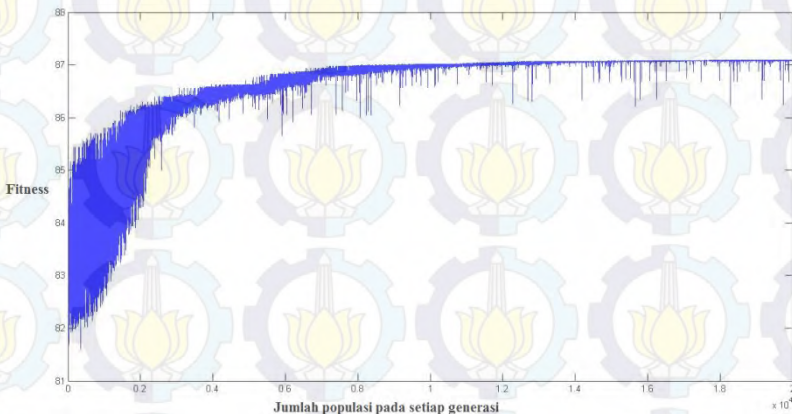
Gambar 4.20. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan simulasi model awal.

Berdasarkan hasil perbandingan data antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan hasil simulasi desain awal, diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai LMTD (**Tabel.4.20**) pada semua HE, kecuali pertama, kelima, ketujuh, dan kedelapan. Peningkatan terbesar terdapat pada *heat exchanger* kesepuluh, yaitu sebesar 383.18%. Sedangkan peningkatan terkecil terdapat pada *heat exchanger* ketiga, yaitu sebesar 0.19%. Diketahui juga bahwa peningkatan nilai U (**Tabel.4.21**) ditemukan pada semua *heat exchanger* kecuali HE pertama, kedua, dan ketiga. Peningkatan nilai U terbesar adalah 299.71%. Selain itu, diketahui bahwa terjadi peningkatan panas yang dihasilkan (**Tabel.4.22**) terdapat pada semua *heat exchanger* kecuali pada HE pertama. Peningkatan Q terbesar terdapat pada *heat exchanger* kesembilan, yaitu sebesar 38.3% dan peningkatan terkecil sebesar 0.19% pada *heat exchanger* ketiga. Optimasi dengan teknologi *coiled wire insert* dapat mencapai heat recovery sebesar 8.925 MW atau 7.69%.

Hasil optimasi dengan menggunakan teknologi *helical baffle* dapat dilihat pada **Tabel 4.23**. Hasil perhitungan *fitness function* pada optimasi dengan teknologi *helical baffle* dapat dilihat pada **Gambar 4.21**.

Tabel 4.23. Hasil optimasi *helical baffle*

No	HE	Tci	Tco	Thi	Tho	Uc	Q
1	E-101	32.0	67.6	175.5	107.4	432.870	10.6004
2	E-102	67.6	89.0	121.0	91.9	466.600	7.0634
3	E-103	89.0	127.1	187.0	130.0	434.150	13.7269
4	E-131	127.1	146.0	243.6	137.5	308.783	7.3595
5	E-104	146.0	170.5	193.0	159.9	774.867	9.1897
6	E-105	170.5	178.1	212.0	175.5	676.640	3.1532
7	E-106	178.1	190.3	277.0	180.6	514.052	4.7581
8	E-107	190.3	204.5	305.0	196.3	514.155	5.8301
9	E-108	204.5	234.0	260.0	220.7	717.839	12.8023
10	E-109	234.0	262.9	336.0	243.6	469.743	12.6132
Total							87.097

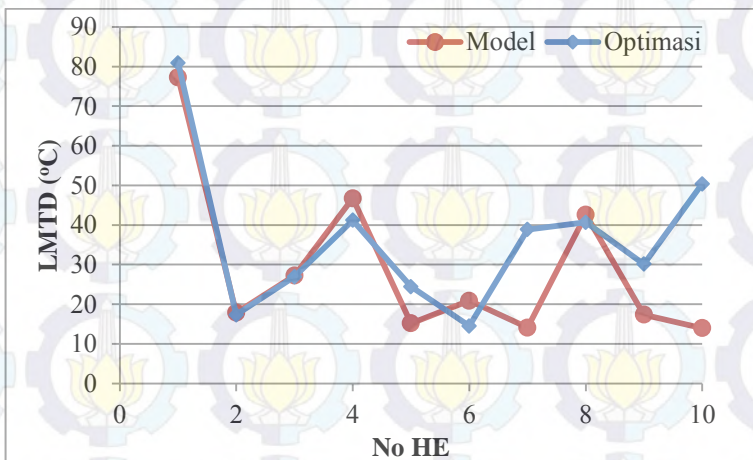


Gambar 4.21. Hasil perhitungan *fitness* pada optimasi dengan *helical baffle*

Hasil dari perbandingan optimasi dengan teknologi *helical baffle* dan model dapat dilihat pada **Tabel 4.24-4.26** dan **Gambar 4.22-4.24**.

Tabel 4.24. Perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal

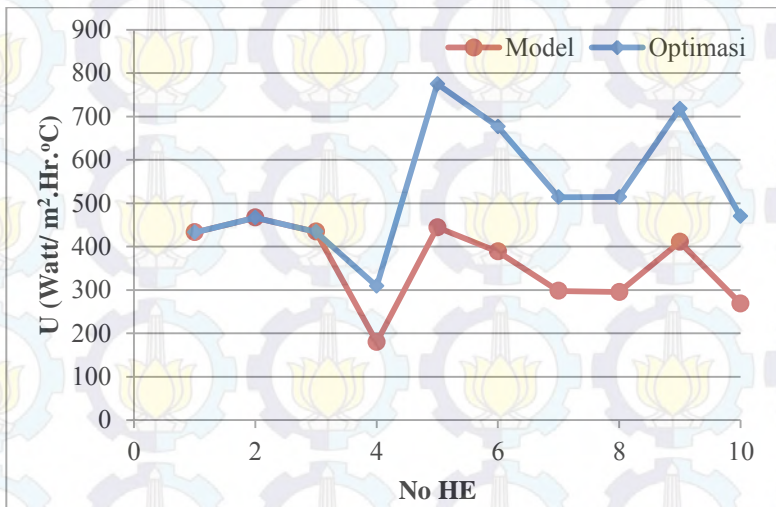
No	HE	LMTD Optimasi	LMTD design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	80.90	77.26	3.64	4.71%
2	E-102	17.32	17.86	-0.54	-3.02%
3	E-103	26.94	27.22	-0.28	-1.03%
4	E-131	41.22	46.74	-5.52	-11.80%
5	E-104	24.44	15.20	9.24	60.83%
6	E-105	14.49	20.90	-6.41	-30.68%
7	E-106	38.87	14.10	24.77	175.70%
8	E-107	40.67	42.61	-1.93	-4.54%
9	E-108	30.14	17.36	12.78	73.59%
10	E-109	50.39	13.99	36.40	260.27%



Gambar 4.22. Perbandingan nilai LMTD ($^{\circ}\text{C}$) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal

Tabel 4.25. Perbandingan nilai U (Watt/ $M^2.Hr.^{\circ}C$) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal.

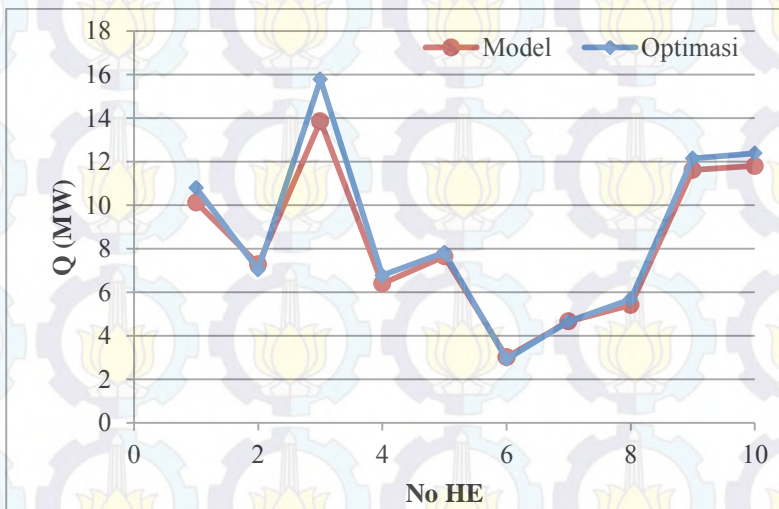
No	HE	U Optimasi	U design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	432.87	432.87	0.00	0.00%
2	E-102	466.60	466.60	0.00	0.00%
3	E-103	434.15	434.15	0.00	0.00%
4	E-131	308.78	179.45	129.33	72.07%
5	E-104	774.87	444.27	330.60	74.42%
6	E-105	676.64	388.44	288.20	74.19%
7	E-106	514.05	297.73	216.32	72.66%
8	E-107	514.15	295.29	218.87	74.12%
9	E-108	717.84	410.54	307.30	74.85%
10	E-109	469.74	268.54	201.21	74.93%



Gambar 4.23. Perbandingan nilai U (Watt/ $M^2.Hr.^{\circ}C$) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal.

Tabel 4.26. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal.

No	HE	Q Optimasi	Q design awal	Selisih	Persentase
1	E-101	10.793	10.123	0.670	6.62%
2	E-102	7.027	7.275	-0.248	-3.41%
3	E-103	15.779	13.861	1.917	13.83%
4	E-131	6.770	6.399	0.371	5.79%
5	E-104	7.825	7.647	0.178	2.32%
6	E-105	2.927	3.012	-0.085	-2.81%
7	E-106	4.651	4.661	-0.009	-0.20%
8	E-107	5.676	5.409	0.267	4.94%
9	E-108	12.149	11.618	0.531	4.57%
10	E-109	12.384	11.804	0.580	4.91%



Gambar 4.24. Perbandingan nilai Q (MW) antara hasil optimasi *helical baffle* dengan simulasi model awal.

Berdasarkan hasil perbandingan data antara hasil optimasi *coiled wire insert* dengan hasil simulasi desain awal, diketahui

bahwa terjadi peningkatan nilai LMTD (**Tabel.4.24**) pada HE pertama, kelima, ketujuh, kesembilan, dan kesepuluh. Peningkatan terbesar terdapat pada *heat exchanger* kesepuluh, yaitu sebesar 260.27%. Sedangkan peningkatan terkecil terdapat pada *heat exchanger* pertama, yaitu sebesar 4.71%. Diketahui juga bahwa peningkatan nilai U (**Tabel.4.25**) ditemukan pada semua *heat exchanger* kecuali HE pertama, kedua, dan ketiga. Peningkatan nilai U terbesar adalah 74.93%. Selain itu, diketahui bahwa terjadi peningkatan panas yang dihasilkan (**Tabel.4.26**) terdapat pada semua *heat exchanger* kecuali pada HE kedua, keenam, dan ketujuh. Peningkatan Q terbesar terdapat pada *heat exchanger* ketiga, yaitu sebesar 13.83% dan peningkatan terkecil sebesar 2.32% pada *heat exchanger* kelima. Optimasi dengan teknologi *helical baffle* dapat mencapai *heat recovery* sebesar 4.172 MW atau 3.6%.

4.6. Retrofit HEN

Optimasi skenario pertama memiliki besar peningkatan *heat recovery* yang terbesar diantara semua optimasi yang dilakukan, yaitu 13.21%. Berbeda dengan optimasi lainnya, hasil optimasi ini dicapai dengan tidak menggunakan HE pertama, kedua, ketiga, dan kelima. Hal ini dikarenakan pada HE tersebut memiliki nilai U yang paling minimum, yaitu 0 Watt/ m².Hr.°C. Peningkatan U terkecil adalah 3391.14% dan terbesar adalah 20452.25%. Besar peningkatan tersebut menunjukkan bahwa HEN memiliki potensial yang sangat besar untuk dilakukan retrofit. Retrofit dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi yang sudah ada, maupun dengan menambah HE baru sehingga dapat meningkatkan U.

Pada optimasi skenario kedua diketahui bahwa peningkatan *heat recovery* sebesar 9.14%. Besar nilai tersebut dicapai dengan tidak melakukan perubahan U pada HE pertama, kedua, ketiga, dan kelima. Peningkatan U pada optimasi ini memiliki nilai yang terbesar diantara semua optimasi, yaitu 29604.18%. Tidak berbeda jauh dengan optimasi skenario pertama, optimasi ini memiliki potensial yang sangat besar untuk dilakukan retrofit.

Retrofit dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi yang sudah ada, maupun dengan menambah HE baru sehingga dapat meningkatkan U.

Pada optimasi skenario ketiga, besar *heat recovery* yang dihasilkan pada setiap teknologi memiliki nilai yang berbeda-beda. Peningkatan *heat recovery* terbesar pada optimasi skenario ketiga terdapat pada optimasi dengan batasan teknologi *coiled wire insert*, yaitu 7.69% dan peningkatan terkecil terdapat pada optimasi dengan batasan teknologi *twisted tape insert*, yaitu 2.77%. Sedangkan pada optimasi dengan batasan *internal fin* dan *helical baffle* memiliki peningkatan *heat recovery* sebesar 3.6% dan 4.61%. Pada optimasi ini, peningkatan U terbesar terdapat pada optimasi dengan batasan *coiled wire insert*, yaitu 299.71% dan peningkatan U terkecil terdapat pada optimasi dengan batasan *twisted tape insert*, yaitu 35.47%. Retrofit dapat dilakukan pada optimasi ini, tetapi tidak semua HE perlu dilakukan retrofit. Pada optimasi dengan batasan *internal fin*, HE pertama tidak perlu dilakukan retrofit karena tidak terdapat perubahan nilai U. Begitu juga pada optimasi dengan batasan *twisted tape insert*, HE pertama dan kedua tidak perlu dilakukan retrofit. Sedangkan pada optimasi dengan batasan *coiled wire insert* dan *helical baffle*, HE pertama, kedua, dan ketiga tidak perlu dilakukan retrofit dikarenakan tidak ada peningkatan nilai U.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN


5.1. Kesimpulan

Dari penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu

1. Besar peningkatan *overall heat transfer coefficient* terbesar pada optimasi skenario pertama adalah 20452.25%, pada optimasi skenario kedua adalah 29604.18%, pada optimasi skenario ketiga dengan *internal fin* adalah 51.95%, dengan *twisted tape insert* adalah 35.47%, dengan *coiled wire insert* adalah 299.71%, dan dengan *helical baffle* adalah 74.93%.
2. Besar *heat recovery* terbesar didapatkan pada hasil optimasi skenario pertama sebesar 13.21%, sedangkan pada optimasi skenario kedua sebesar 9.14%, dan pada optimasi skenario ketiga sebesar 3.60% dengan batasan teknologi *internal fin*, 2.77% dengan batasan teknologi *twisted tape inserts*, 7.69% dengan teknologi *coiled wire insert*, dan 4.61% dengan teknologi *helical baffle*.
3. Dari hasil optimasi skenario pertama dan kedua, retrofit dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi yang ada dan dengan menambah HE baru sehingga dapat meningkatkan nilai U, sedangkan pada optimasi dengan skenario ketiga, retrofit dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi yang sudah ada, yaitu *internal fin*, *twisted tape insert*, *coiled wire insert*, dan *helical baffle*.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan adalah dalam melakukan retrofit HEN dengan menggunakan teknologi yang sudah ada, diperlukan studi terlebih dahulu untuk mendapatkan besar perubahan *overall heat transfer coefficient* yang sesuai.



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A

Berikut ini adalah data *heat exchanger* (HE) pada setiap HEN yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel A.1. Data design HE E-101B

E-101B				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Kerosene		Crude	
Fluid Quantity (kg/hr)	233388		555795	
(kg/s)	64.83		154.3875	
Temperature in/out C	169	104	32	66
Average Temperature	136.5		49	
dT	65		34	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.000297	0.000477	0.001974	0.001137
average	0.000387		0.0015555	
Density (kg/m ³)	702	756	804	776
average	729		790	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2553.948	2252.4984	1842.192	2009.664
average	2403.2232	0.667562	1925.928	0.53498
Thermal conductivity (W/m K)	0.100018	0.113974	0.123278	0.120952
average	0.106996		0.122115	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0004		0.0007	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	372.2			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	432.8686			
A (m ²)	289			

Tabel A.2. Data design HE E-102AB

E-102AB				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Naphta		Crude	
Fluid Quantity (kg/hr)	340640		555795	
(kg/s)	94.6222		154.3875	
Temperature in/out C	121	91	66	88
Average Temperature	106		77	
dT	30		22	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.000182	0.00022	0.001137	0.000843
average	0.000201		0.00099	
Density (kg/m ³)	623	656	776	758
average	639.5		767	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2553.948	2386.47 6	2009.664	2260.872
average	2470.212	0	2135.268	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.103507	0.11281 1	0.120952	0.112811
average	0.108159		0.1168815	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0003		0.0007	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	401.2			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	466.5956			
A (m ²)	636.4			

Tabel A.3. Data design HE E-103

E-103				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Crude		Kerosene	
Fluid Quantity (kg/hr)	654520		353550	
(kg/s)	181.8111		98.2083	
Temperature in/out C	78	115	187	122
Average Temperature	96.5		154.5	
dT	37		65	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.000884	0.000561	0.000233	0.000382
average	0.000723		0.000308	
Density (kg/m ³)	792	763	680	737
average	777.5		708.5	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2248.3116	2394.8496	2587.4424	2348.7948
average	2321.5806	0	2468.1186	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.103507	0.096529	0.090714	0.102344
average	0.100018		0.096529	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0007		0.0003	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	373.3			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	434.1479			
A (m ²)	670			

Tabel A.4. Data design HE E-131A1/A2/B1/B2

E-131A1/A2/B1/B2				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Reduced Crude		Crude	
Fluid Quantity (kg/hr)	95820		719972	
(kg/s)	26.6167		199.9922	
Temperature in/out C	247	145	115	129
Average Temperature	196		122	
dT	102		14	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.00111	0.00448	0.00056	0.00048
average	0.002795		0.00052	
Density (kg/m ³)	803	859	763	750
average	831		756.5	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2738.1672	2348.7948	2394.850	2449.278
average	2543.481	0	2422.064	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.0756	0.086062	0.0965	0.09304
average	0.0808		0.0948	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.001		0.0007	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	154.3			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	179.4509			
A (m ²)	620			

Tabel A.5. Data design HE E-104

E-104				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Desalted Crude		Kerosene	
Fluid Quantity (kg/hr)	557226		376814	
(kg/s)	154.785		104.671	
Temperature in/out C	124	152	193	155
Average Temperature	138		174	
dT	28		38	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.00057	0.00045	0.00025	0.00031
average	0.00051		0.00028	
Density (kg/m ³)	730	706	672	707
average	718		689.5	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2386.476	2512.08	2679.552	2470.212
average	2449.278	0.000165 93	2574.882	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.10932	0.10234	0.09537	0.10351
average	0.10583		0.09944	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0007		0.0003	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	382			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	444.266			
A (m ²)	696			

Tabel A.6. Data design HE E-105AB

E-105AB				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Desalted Crude		Kerosene	
Fluid Quantity (kg/hr)	557226		116694	
(kg/s)	154.785		32.415	
Temperature in/out C	152	161	212	169
Average Temperature	156.5		190.5	
dT	9		43	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.00045	0.00041	0.00023	0.00030
average	0.00043		0.00027	
Density (kg/m ³)	706	698	659	702
average	702		680.5	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2512.08	2637.684	2721.42	2553.948
average	2574.882	0	2637.684	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.10234	0.10002	0.09071	0.10002
average	0.10118		0.09537	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0007		0.0003	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	334			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	388.442			
A (m ²)	354			

Tabel A.7. Data design HE E-106A1/A2/B1/B2

E-106 A1/A2/B1/B2				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Desalted Crude		LDO	
Fluid Quantity (kg/hr)	557226		64586	
(kg/s)	154.785		17.941	
Temperature in/out C	161	174	277	174
Average Temperature	167.5		225.5	
dT	13		103	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.00039	0.00039	0.00033	0.00033
average	0.00039		0.00033	
Density (kg/m ³)	698	686	672	761
average	692		716.5	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2595.816	2595.816	2679.552	2679.552
average	2595.816	0	2679.552	0
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0007		0.0004	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	256			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	297.728			
A (m ²)	816			

Tabel A.8. Data design HE E-107AB

E-107AB				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Desalted Crude		HDO	
Fluid Quantity (kg/hr)	557226		66204	
(kg/s)	154.785		18.39	
Temperature in/out C	174	188	305	197
Average Temperature	181		251	
dT	14		108	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.000375	0.000340	0.000266	0.000525
average	0.000358		0.000396	
Density (kg/m ³)	686	673	742	658
average	679.5		700	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2595.816	2679.552	3056.364	2637.684
average	2637.684	0	2847.024	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.098855	0.095366	0.079084	0.096529
average	0.097111		0.087807	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0007		0.0005	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	253.9			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	295.2857			
A (m ²)	375			

Tabel A.9. Data design HE E-108A1/A2/B1/B2

E-108 A1/A2/B1/B2				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Desalted Crude		LDO	
Fluid Quantity (kg/hr)	557226		421511	
(kg/s)	154.785		117.0864	
Temperature in/out C	188	218	260	220
Average Temperature	203		240	
dT	30		40	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.00034	0.000279	0.000261	0.000323
average	0.0003095		0.000292	
Density (kg/m ³)	673	642	682	716
average	657.5		699	
Specific heat / Cp (J/Kg.°K)	2679.552	2805.156	2847.024	2679.552
average	2742.354	0	2763.288	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.095366	0.089551	0.086062	0.096529
average	0.0924585		0.0912955	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.0007		0.0004	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	353			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	410.539			
A (m ²)	914			

Tabel A.10. Data design HE E-109A1/A2/B1/B2

E-109A1/A2/B1/B2				
Fluid allocation	Tube		Shell	
Fluid name	Reduced Crude		Desalted Crude	
Fluid Quantity (kg/hr)	165608		557226	
(kg/s)	46.002		154.785	
Temperature in/out C	336	246	218	246
Average Temperature dT	291		232	
	90		28	
Dynamic viscosity (Ns/m ²)	0.00063	0.00141	0.00028	0.00024
average	0.00102		0.00026	
Density (kg/m ³)	746	799	642	611
average	772.5		626.5	
Specific heat / Cp (J/Kg. °K)	3098.232	2679.552	2805.156	2888.892
average	2888.892	0	2847.024	0
Thermal conductivity (W/m K)	0.08141	0.09304	0.08955	0.08606
average	0.08723		0.08781	
Fouling Resistance (m ² *hr*°C/kcal)	0.001		0.0007	
U (Kcal/M ² .Hr.°C)	230.9			
U (Watt/M ² .Hr.°C)	268.5367			
A (m ²)	896.6			

LAMPIRAN B
PFD HEN

